

Alma Mater Studiorum – Università di Bologna

DOTTORATO DI RICERCA IN

Meccanica e Scienze Avanzate dell'Ingegneria

Ciclo XXIV

Settore Concorsuale di afferenza: 09/C1

Settore Scientifico disciplinare: ING-IND/09

Studio del comportamento flessio-torsionale di un telaio in materiale composito per vettura sportiva

Presentata da: Giovanni Paolo Bonelli

Coordinatore Dottorato
Chiar.mo Prof.Ing.Davide Moro

Relatore
Chiar.mo Prof.Ing.Pier Gabriele Molari

Esame finale anno 2012

Dedicato a mia madre Rosanna e alla mia futura moglie Barbara

"Gli uomini credono volentieri ciò che desiderano sia vero." Gaio Giulio Cesare (100-44 a.C.),

Indice

Introduzione	1
1 Rinforzi e Matrici	3
1.1 Rinforzi	3
1.1.1 Introduzione	3
1.1.2 Fibre di carbonio	4
1.1.3 Fibre di vetro	9
1.1.4 Fibre di aramide (Kevlar)	12
1.1.5 Formato di fibre per compositi	20
1.1.6 Codice di orientazione del laminato	26
1.1.7 Preforme in 3D	28
1.1.8 Forme specifiche per fibre di carbonio	36
1.1.9 Forme specifiche per fibre di vetro	37
1.1.10 Forme specifiche per fibre di aramide	39
1.1.11 Tessuti ibridi	40
1.2 Matrici	42
1.2.1 Introduzione	42
1.2.2 Matrici polimeriche	45
1.2.3 Matrici termoindurenti	47
1.2.4 Matrici termoplastiche	69
2 Tecnologie	84
2.1 Manual Prepreg + Autoclave	84
2.1.1 Introduzione processi a stampo aperto	84
2.1.2 Caratteristiche tecniche ed applicazioni	86
2.2 Prepreg per media serie	98
2.2.1 Automated Tape Laying	98
2.2.2 Prepreg + Pressa	103
2.2.3 MFP (Stamping of prepreg bundles)	104
2.2.4 Low - Temp Prepreg	105
2.3 RTM	106

2.3.1	Introduzione ai processi di Injection Moulding	106
2.3.2	Caratteristiche del processo	107
2.4	Resin Tranfer Moulding e SRIM	109
2.4.1	Descrizione della tecnologia	109
2.4.2	Materiali e forme utilizzate	113
2.4.3	Proprietà del componente in RTM	116
2.4.4	Valutazioni sull'impiego di Injection Moulding in vetture di media serie . . .	116
2.4.5	<i>Prestazioni meccaniche</i>	117
2.4.6	<i>Prestazioni in riferimento all'urto</i>	117
2.4.7	<i>Ripetibilità ed affidabilità</i>	118
2.4.8	<i>Vincoli di forma</i>	118
2.4.9	<i>Conclusioni</i>	119
2.5	Vacuum Infusion	119
2.5.1	Introduzione	119
2.5.2	Caratteristiche tecniche	120
2.5.3	Possibilità e limiti del vacuum infusion:	120
2.5.4	Applicazioni	122
2.5.5	Descrizione tecnica della realizzazione della parte	122
2.5.6	Proprietà rappresentative del componente	127
2.5.7	Osservazioni	129
2.6	Filament Winding	129
2.6.1	Introduzione	129
2.6.2	Vantaggi e svantaggi	132
2.6.3	Effetti della tensione delle fibre	134
2.6.4	Modelli di avvolgimento	135
2.6.5	Attrezzature ed equipaggiamento	137
2.6.6	Tipi di mandrini	138
2.6.7	Macchine per avvolgimento	139
2.6.8	Tensionatori	139
2.6.9	Forni	140
2.6.10	Osservazioni	140
2.6.11	Applicazioni	141
2.7	Pultrusione	142
2.7.1	Introduzione	142
2.7.2	Caratteristiche tecniche	143
2.7.3	Vantaggi del processo	144
2.7.4	Applicazioni	144
2.7.5	Settori tecnologici chiave	146
2.7.6	Composizione del prodotto	146

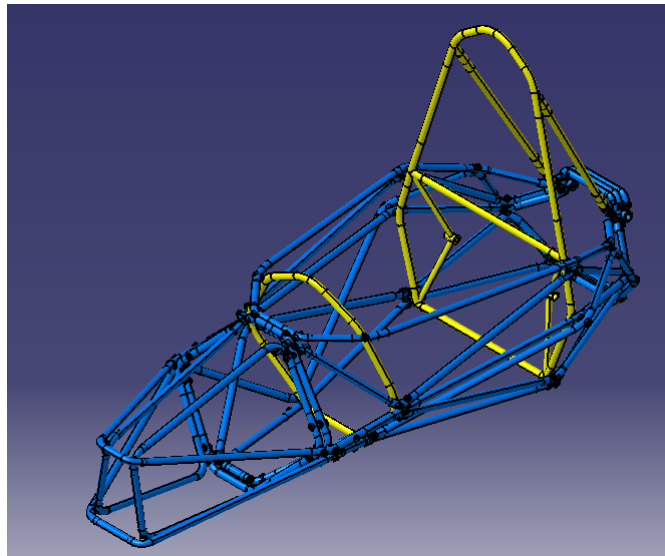
2.7.7	Realizzazione del processo	147
2.7.8	Alimentazione del materiale	148
2.7.9	Attrezzature di processo	150
2.7.10	Materiali	152
2.7.11	Proprietà del prodotto pultruso	152
2.7.12	Proprietà fisiche	154
2.8	Pull Winding	154
2.8.1	Introduzione	154
2.8.2	La tecnica Pull Winding	155
2.8.3	Pullwinding	156
2.9	Braiding	157
2.9.1	Introduzione	157
2.9.2	Classificazione dei tessuti braiding	159
2.9.3	Braiding bidimensionale	160
2.9.4	Braiding tridimensionale	161
2.9.5	Proprietà dei compositi in braiding	162
2.9.6	Resistenza a impatto	166
2.10	Produzione di compositi in matrice termoplastica (Thermoforming)	167
2.10.1	Introduzione	167
2.10.2	Caratteristiche dei compositi con matrici termoplastiche	168
2.10.3	Forme dei materiali	169
2.10.4	Descrizione delle tecniche	171
2.10.5	Osservazioni	185
3	Caratterizzazione Sperimentale di laminati compositi	186
3.1	Introduzione	186
3.1.1	Proprietà meccaniche e fisiche di interesse del laminato classico	187
3.1.2	Differenze tra la caratterizzazione di materiali compositi e materiali isotropi .	187
3.1.3	Approccio Building-Block per la validazione strutturale di parti in materiale composito	188
3.1.4	Livelli building-block	190
3.2	Test per la determinazione delle proprietà meccaniche	191
3.2.1	Proprietà in Trazione	191
3.2.2	Proprietà in Compressione	193
3.2.3	Proprietà a taglio nel piano	193
3.2.4	Resistenza a taglio interlaminare	195
3.3	Prove sperimentali	195
3.3.1	Introduzione	195
3.3.2	Prove a trazione secondo ASTM D 3039	196

3.3.3	Prove a compressione secondo ASTM Standard D6641/D6641M-01 (Combined Loading Compression CLC Test Fixture)	202
3.3.4	Prove a taglio nel piano secondo ASTM D 5379	208
3.3.5	Prove a taglio interlaminare secondo ASTM D 2344/D 2344M-00	214
3.3.6	Database	220
4	<i>Studio del comportamento flessione torsionale di un telaio nastrato in composito</i>	221
4.1	Sviluppo di una tecnologia di produzione automatizzata	221
4.2	Progettazione del telaio nastrato mediante nastratura automatizzata su inserti di lega leggera e cores	223
4.2.1	Disegno di un telaio di vettura Formula Student in materiale composito realizzato mediante nastratura automatizzata	227
4.2.2	La rigidezza torsionale di un telaio	228
4.2.3	Trattazione matematica e grafica degli output	229
4.2.4	Calcolo della rigidezza torsionale telaio Formula SAE nastrato	230
4.2.5	Calcolo della rigidezza torsionale telaio Formula SAE in tubolari d'acciaio	236
4.2.6	Verifica sperimentale della Rigidezza torsionale	239
4.2.7	Prove a trazione su parte elementare del telaio	243
4.2.8	Calcolo della rigidezza torsionale telaio con valori sperimentali della parte elementare	247
5	Conclusioni e sviluppi futuri	251
	Ringraziamenti	254
	Elenco delle Figure	255

Introduzione

L'obiettivo principale di un telaio di autovettura è quello di collegare rigidamente tra loro i gruppi sospensivi anteriore e posteriore e di prevedere attacchi ausiliari per tutti i restanti sistemi e sottosistemi di cui la vettura è equipaggiata. Esistono varie tipologie di telai per autovettura ma, quelle più adatte ad equipaggiare una vettura FSAE sono sicuramente il traliccio in tubi ("space-frame") e la monoscocca in fibra di carbonio. Il primo tipo è sicuramente quello più diffuso, grazie alla sua maggior semplicità sia progettuale che di realizzazione. I parametri fondamentali che caratterizzano un telaio per vetture da competizione in genere sono sicuramente la massa e la rigidità. La massa dello chassis deve essere ovviamente più bassa possibile in quanto questo costituisce generalmente il terzo contributo, in ordine di importanza, dopo il pilota e il motore, alla massa complessiva della vettura. Quest'ultima deve rimanere il più leggera possibile al fine di una performance migliore nelle varie fasi dinamiche in cui dovrà essere impegnata. Riguardo alla rigidità del telaio, essa può essere distinta in rigidità flessionale e rigidità torsionale: di fatto, solo la rigidità torsionale va ad influire sui carichi che si trasferiscono agli pneumatici della vettura; pertanto quando si parla di rigidità di un telaio, ci si riferisce alla sua capacità di sopportare carichi di tipo torsionale. Stabilire a priori un valore adeguato per la rigidità torsionale di un telaio è impossibile. Tale valore dipende infatti dal tipo di vettura e dal suo impiego. In una vettura di tipo Formula, la rigidità torsionale del telaio deve essere tale da garantire un corretto lavoro delle sospensioni: gli unici cedimenti elastici causati dalle sollecitazioni dinamiche della vettura, devono essere quelli dovuti agli ammortizzatori.

L'intento della sperimentazione di seguito descritta è stato di disegnare un telaio intercambiabile al telaio 2009 in tubolare d'acciaio (stessi punti di attacco motore, telaio posteriore, attacchi sospensioni anteriori) e che garantisca un sostanziale vantaggio in termini di peso a pari rigidità torsionale.



Capitolo 1

Rinforzi e Matrici

1.1 Rinforzi

1.1.1 Introduzione

I materiali realizzati sotto forma di filamenti o fibre di piccolo diametro presentano elevate resistenze in considerazione del fatto che le proprietà meccaniche aumentano notevolmente al diminuire delle dimensioni del campione del materiale su cui si effettua la misura. Ciò è spiegabile sia per meccanismi strutturali coinvolti nel raggiungimento di dimensioni molto piccole, come appunto nel caso di fibre sottili, sia per l'eliminazione, o comunque minore presenza, di difetti superficiali o interni.

Le caratteristiche effettivamente presentate dalla maggior parte dei materiali sono inferiori di circa due ordini di grandezza rispetto alle loro caratteristiche massime teoriche. Tale discordanza di valori è in genere dovuta alla presenza di intagli, imperfezioni e difetti, sia interni sia esterni, del materiale. Pertanto minimizzare o limitare tali difetti significa produrre un aumento delle caratteristiche meccaniche dei materiali.

Grazie alle loro dimensioni estremamente limitate le fibre presentano una perfezione strutturale fuori dal comune e questa caratteristica, unita alle proprietà intrinseche dei materiali costitutivi, assicurano ad esse in molti casi resistenza meccanica molto elevata, modulo elastico molto alto, peso specifico basso e comportamento generalmente elastico lineare fino a rottura.

Le fibre più usate nella produzione di materiali compositi a matrice polimerica sono le fibre di carbonio e le fibre di vetro. Le fibre di aramide (indicate correntemente col nome commerciale Kevlar della Du Pont) e le fibre metalliche vengono meno utilizzate rispetto alle precedenti.

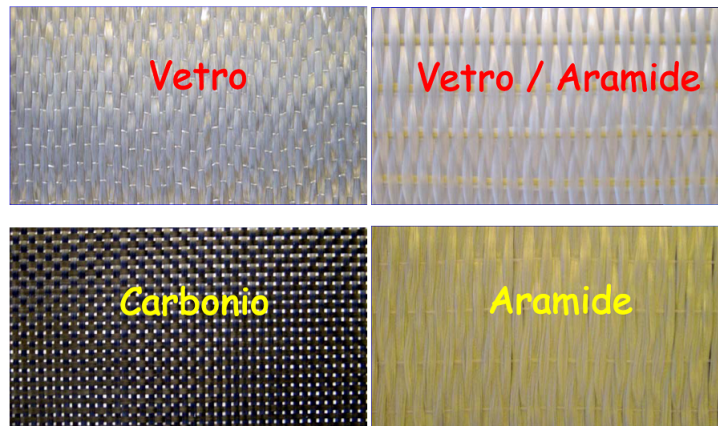


Figura 1.1: Aspetto di diversi tessuti in fibra

1.1.2 Fibre di carbonio

Tali fibre hanno subito negli ultimi anni una notevole diffusione, grazie ad un significativo miglioramento del rapporto prestazioni/costo, uscendo così dall'esclusivo campo aeronautico e trovando uso sempre crescente nel campo dei trasporti terrestri, off-shore, sportivo e civile (retrofitting sismico di ponti ecc).

Sono caratterizzate da elevata resistenza ($\sigma_r = 2100 - 2500$ MPa), solo di poco più bassa delle fibre di vetro, ma più elevata rigidità ($E = 240.000 - 390.000$ MPa, circa-cinque volte quello delle fibre di vetro) unita ad una elevata conducibilità elettrica e termica ed una elevatissima resistenza alla corrosione. Quest'ultima proprietà fa sì che compositi con fibre di carbonio oltre che in applicazioni strutturali siano anche usati per sostituire elementi metallici in applicazioni caratterizzate da elevata corrosione. Inoltre, il coefficiente di espansione termico negativo permette di ottenere materiali compositi con coefficiente di dilatazione praticamente nullo.

Le fibre di carbonio sono pure caratterizzate da facile infiammabilità ed elevato potenziale elettrolitico, superiore per esempio a quello dell'alluminio. Nelle giunzioni con alluminio (ricorrenti in campo aeronautico) pertanto è necessario prestare molta attenzione all'insorgenza di fenomeni corrosivi.

Il legame ad alta resistenza tra gli atomi di carbonio nella direzione dello strato comporta il modulo elastico estremamente alto, considerato che i deboli legami del tipo di van der Waals tra strati vicini determinano un modulo elastico più basso in quella direzione. Una struttura cristallina di questo tipo è quindi in grado di resistere bene a sollecitazioni esterne giacenti su piani paralleli e/o coincidenti con l'andamento del piano atomico basale, mentre è molto meno resistente rispetto a sollecitazioni ortogonali a questo. In conseguenza di questo fatto le fibre vanno orientate opportunamente nella direzione di massima sollecitazione per utilizzarne al meglio le caratteristiche di resistenza meccanica, anche se questo non è sempre pienamente ottenibile.

In senso stretto il termine "fibre di grafite" è inesatto poiché nelle fibre di grafite non vi è alcuna struttura cristallina. Il termine "fibre di grafite" è usato per descrivere le fibre che hanno un contenuto in carbonio maggiore del 99%, mentre il termine "fibre di carbonio" definisce le fibre che hanno

un contenuto in carbonio dall'80% al 95%. Il carbonio contenuto è funzione della temperatura del trattamento a caldo.

Classificazione e proprietà delle fibre di carbonio

Più in dettaglio, in base alla rigidità si distinguono 5 categorie di fibre di carbonio quali:

1. LM (low modulus), utilizzato per aumentare la tenacità della matrice;
2. SM (standard modulus);
3. (HT) high tenacity-high strength or (IM) intermediate modulus;
4. HM (high modulus);
5. UHM (ultra high modulus) di uso elettivo nell'industria aeronautica e aerospaziale.

A partire dal PAN si possono in pratica ottenere fibre la cui combinazione resistenza-rigidità può essere variata con continuità entro un ampio range. Tra queste molto utilizzate sono le fibre HM per la possibilità offerta di costruire compositi con rigidità confrontabile con quella dell'acciaio, che consente di sostituire facilmente elementi strutturali prima realizzati in acciaio con elementi in composito significativamente più leggeri (peso circa $\frac{1}{4}$). Nella seguente tabella sono riportate le caratteristiche tipiche di fibre di carbonio di largo uso.

Fabbricante	Nome commerciale	Precursore	Resistenza a trazione (MPa)	Modulo elastico (MPa)	Densità (g/cm ³)
Carborundum	Celion GY70	PAN	2070	607 000	1,96
	3000	PAN	2860	235 000	1,75
	6000	PAN	2920	228 000	1,75
Great lakes co.	Fortafi 3 T	PAN	1380	138 000	1,70
	4 T	PAN	2410	255 000	1,70
	5 T	PAN	2760	331 000	1,80
	6 T	PAN	2900	407 000	1,90
Hercules	Magnamite AS	PAN	2760	221 000	
	HMS	PAN	3100	345 000	
	KCF100(carb.)	PITCH	1104	45 000	1,61
	KCF200(graf.)	PITCH	1104	47 000	1,62
Morgan Ltd	Modmor 1	PAN (TOW)	2415	386 000	1,99
	Modmor 2	PAN (TOW)	2485	276 000	2,74
	Modmor 3	PAN (TOW)	2415	221 000	
Stakepole	30/A TOW	PAN	2760	221 000	1,74
	1/4 CF 30	PAN	2243	207 000	1,73
	30 R Roving	PAN	1553	262 000	1,75
	30 Y/800 D	PAN	1553	262 000	2,75
	30 Y/300 D	PAN	1553	262 000	1,75
Toray	Torayka T300	PAN	3000	250 000	1,8
	Torayka T800	PAN	5000	250 000	
	Torayka M40	PAN	2400-3000	400 000	
Toho	Besfight ST1	PAN	3600	240 000	
	Besfight ST2	PAN	4080	240 000	
	Besfight ST3	PAN	4320	240 000	
Union Carbide	Thormel 25	RAYON	1242	186 000	1,42
	Thormel 40	RAYON	1725	276 000	1,56
	Thormel 50	RAYON	2175	393 000	1,67
	Thormel 75	RAYON	2662	545 000	1,82
	Thormel 300	PAN	2484	221 000	1,76
	Thormel 400	PAN	2760	235 000	1,76
	PAN 50	PAN	2139	393 000	

Tabella 1.1: Proprietà di alcune delle fibre grafite/carbonio commerciali [1]

In pratica la T300 (molto usata), la AS2 e la AS4D sono di tipo HS, la IM6 è di tipo IM, la HMS4 è di tipo HM, la UHM e la M50 sono di tipo UHM.

Il diametro caratteristico delle fibre varia da 7 a 10 μm , con valore medio ricorrente di 8 μm .

Applicazioni tipiche di fibre LM sono tenute per alberi rotanti, come materiale per isolamento per fornaci, e come rinforzo per l'aumento di resistenza. Fibre che garantiscono un modulo specifico maggiore sono le SM, HT e UHM. Le fibre di tipo SM sono vendute da Zolteck sotto il nome di Panex, le HT vengono vendute da Toray sotto il nome di Torayca T1000, e le UHM sono vendute da BP Amoco sotto il nome di Thormel K-100X. La densità della fibra di carbonio aumenta da 1.74 g/cm³ per fibre HT a 2.18 g/cm³ per le UHM. Fibre di carbonio HT hanno le più alte resistenze (7.1 GPa) e resistenze specifiche (0.398 Mm) di ogni tipo di fibra di rinforzo. Fibre UHM hanno i più alti moduli

elastici (966 GPa) e moduli specifici (45.2 Mm) di ogni tipo di fibra di rinforzo. L'elevato valore di modulo specifico è una proprietà importantissima per le applicazioni aerospaziali ed aeronautiche.

Il processo industriale che parte dal rayon è articolato nelle seguenti fasi: il materiale cellulosico di partenza viene ridotto in fibre che vengono successivamente stabilizzate a 400 gradi centigradi, eliminando ossigeno ed idrogeno presenti nella struttura molecolare.

Segue la carbonizzazione a 1500 gradi cent, in atmosfera inerte e quindi la grafitizzazione rapida a 2000°, alla quale segue uno stiramento de 100% in lunghezza dei filamenti che ne consente l'orientamento dei cristalli ottenendo un marcato innalzamento delle caratteristiche meccaniche del prodotto.

I procedimenti riguardanti il bitume sono molteplici, ma comprendono sempre la riduzione in fibre ed il termoindurimento del materiale per tempi lunghi e temperature relativamente basse per evitare la plasticizzazione termica dello stesso.

Seguono quindi la carbonizzazione e la grafitizzazione a 3000 gradi cent. seguita da opportuni trattamenti superficiali.

Le fibre in carbonio prodotte da ogni precursore hanno diversi vantaggi ed inconvenienti in termini sia di costi che di proprietà. Le fibre in carbonio derivate dal PAN hanno costi più bassi e hanno buone proprietà. Esse costituiscono la classe predominante di fibre strutturali di carbonio e sono usate ampiamente nei velivoli militari, nei missili, nei veicoli spaziali. Le fibre in carbonio derivate dal pitch generalmente hanno più alta rigidità e conduttività elettrica, il che le rende utilizzabili nelle strutture di satelliti e in applicazioni di gestione termica, come radiatori e chiusure elettroniche. Le fibre in carbonio derivate dal rayon non sono usate per applicazioni strutturali, ma la loro bassa conduttività termica le rende utili in applicazioni di isolamento e ablativo come ad esempio le teste dei missili, le sezioni coniche anteriori dei veicoli di rientro dallo spazio e gli scudi termici.

Alcune proprietà di fibre di carbonio da precursore PAN:

Property	Commercial, standard modulus	Aerospace		
		Standard modulus	Intermediate modulus	High modulus
Tensile modulus, GPa (10^6 psi)	228 (33)	220–241 (32–35)	290–297 (42–43)	345–448 (50–65)
Tensile strength, MPa (ksi)	380 (550)	3450–4830 (500–700)	3450–6200 (600–900)	3450–5520 (600–800)
Elongation at break, %	1.6	1.5–2.2	1.3–2.0	0.7–1.0
Electrical resistivity, $\mu\Omega \cdot \text{cm}$	1650	1650	1450	900
Thermal conductivity, $\text{W/m} \cdot \text{K}$ ($\text{Btu/ft} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{F}$)	20 (11.6)	20 (11.6)	20 (11.6)	50–80 (29–46)
Coefficient of thermal expansion, axial direction, 10^{-6} K	–0.4	–0.4	–0.55	–0.75
Density, g/cm^3 (lb/in.^3)	1.8 (0.065)	1.8 (0.065)	1.8 (0.065)	1.9 (0.069)
Carbon content, %	95	95	95	+99
Filament diameter, μm	6–8	6–8	5–6	5–8
Manufacturers	Zoltek, Fortafil, SGL	BPAmoco, Hexcel, Mitsubishi Rayon, Toho, Toray, Tenax, Soficar, Formosa		

Tabella 1.2: Proprietà di fibre di carbonio da precursore PAN [1]

Con le fibre di carbonio ottenute da PAN, la resistenza aumenta fino ad un massimo di 1300°C per poi diminuire gradualmente, mentre il modulo aumenta proporzionalmente all'aumentare della

temperatura.

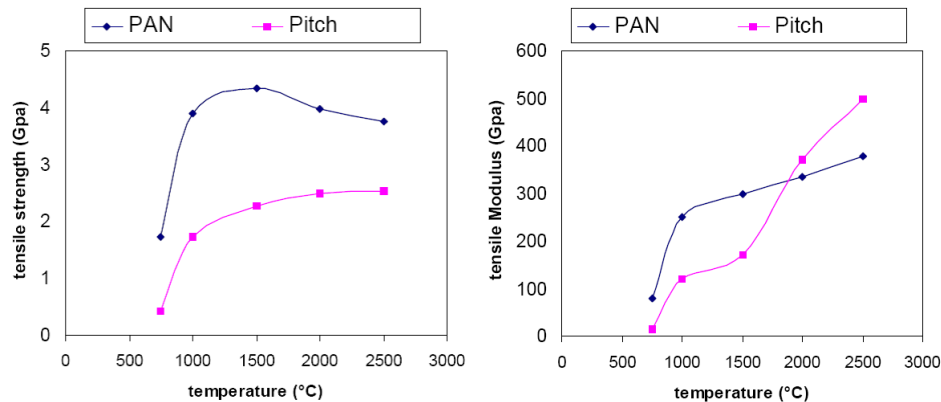


Figura 1.2: Resistenza (temperatura) per fibre di carbonio

Le fibre di carbonio sono disponibili in una grande varietà di combinazioni di proprietà poiché esse possono essere facilmente modificate controllando la loro struttura durante il processo di costruzione (ad es. la temperatura del trattamento termico). Le proprietà delle fibre cambiano da gruppo a gruppo e anche man mano che i costruttori migliorano la tecnologia delle fibre. Gli ultimi dati forniti dal costruttore dovrebbero essere consultati per specifiche fibre e per conoscere le loro attuali proprietà.

Questo materiale viene fornito all'utilizzatore conformemente a norme specifiche: DIN 65184 e DIN 29965, ed è oggi sempre più utilizzato nei campi aeronautico e meccanico perché caratterizzato da alta resistenza meccanica, elevato modulo elastico, bassa densità, bassa sensibilità alle cricche, eccellente capacità di smorzamento delle vibrazioni, bassa sensibilità al fenomeno della fatica presente nell'impiego delle strutture aeronautiche. Ne è inoltre iniziato un uso che va sempre più estendendosi nel campo motoristico e dell'automazione, dove viene adoperato per fabbricare parti o organi meccanici molto sollecitati, come alberi di trasmissione, bielle, telai, ecc..

Ha una alta inerzia chimica ed una elevata resistenza agli attacchi corrosivi sia acidi che alcalini, ed ai solventi organici. Possiede basso coefficiente di espansione termica e bassa conduttività termica.

In campo elettrico e magnetico ha una buona conducibilità elettrica, non è magnetico e possiede un basso coefficiente di assorbimento dei raggi X ed è quindi facilmente verificabile tramite il controllo non distruttivo radiografico. Le temperature in cui è possibile un utilizzo delle fibre di carbonio in ambienti ossidanti è di circa 500°C.

Le fibre di carbonio consentono quindi la realizzazione di elementi strutturali che presentano un'elevata stabilità dimensionale anche in presenza di grandi sollecitazioni dovute a variazioni periodiche di temperatura.

Il loro uso si è perciò andato estendendo dai componenti secondari dei velivoli, come carenature, sportelli di accesso a strumentazioni o dispositivi vari, alle strutture primarie portanti come cassoni alari, derive e timoni verticali piani orizzontali di coda ecc., con la realizzazione di parti di forma sempre più estesa e complicata.

L'uso delle fibre di carbonio nella pratica industriale va fatto nel rispetto delle normative sanitarie e di prevenzione degli infortuni già utilizzati nell'industria tessile.

Occorre inoltre tenere presente che tali fibre possono dare luogo per abrasione a parti molto fini, che, essendo facilmente diffondibili nell'ambiente e possedendo una elevata conducibilità elettrica, possono dare origine a seri inconvenienti negli apparati elettrici che dunque andranno protetti secondo le normative specifiche.

Inoltre il contatto con l'epidermide degli addetti alle lavorazioni può essere irritante specie sulle mani, che dovranno essere protette con guanti durante maneggio dei materiali stessi. Questo accorgimento va adottato anche in vista dell'impregnazione delle fibre con il materiale costituente la matrice che è quasi sempre costituito da resine epossidiche, il cui contatto può risultare dannoso. Particolari precauzioni sono anche necessarie in relazione all'inalazione di polveri di carbonio e vapori di resine epossidiche, la cui cancerogenicità è clinicamente comprovata.

1.1.3 Fibre di vetro

Le fibre di vetro sono le più comuni tra tutte le fibre di rinforzo per materiali compositi con matrice polimerica. I principali vantaggi delle fibre di vetro sono il basso costo comparabile, per alcune di esse, con il costo di una lega leggera di alluminio e l'alta resistenza ($\sigma_r = 2500-4800$ MPa circa), praticamente almeno doppia di quella dei migliori acciai, bassa densità in confronto a quella delle leghe metalliche, anche se elevata in confronto a quella delle fibre organiche, bassa conducibilità elettrica e termica, elevata temperatura massima di esercizio (compresa tra 500 e 1000° C). Per contro le fibre di vetro hanno basso modulo di elasticità longitudinale ($E = 72000 - 90000$ MPa, come alluminio circa) e quindi bassa rigidità, il che comporta elevata deformabilità sotto i carichi applicati e scarsa resistenza all'abrasione il che riduce l'utilizzazione della loro resistenza. Il vetro mantiene il 50% delle sue caratteristiche meccaniche tipiche fino ad una temperatura di 370 gradi centigradi, scendendo al 25% a 538 gradi centigradi.

Esse inoltre mostrano scarsa aderenza ad alcune matrici resinose polimeriche, in particolare in presenza di umidità. Per migliorare l'adesività, la superficie delle fibre di vetro spesso viene trattata con sostanze chimiche chiamate coupling agents (per la maggior parte silani). Le fibre di vetro hanno anche un modulo elastico più basso di quello di altre fibre di rinforzo di nuova generazione come il Kevlar, il carbonio ed il boro.

Classificazione e proprietà delle fibre di vetro

Esistono tre diversi tipi di fibra di vetro utilizzati nella produzione di compositi, quali il tipo:

- E, di gran lunga il più utilizzato ed economico, costituito essenzialmente da silice (SiO_2), allumina (Al_2O_3) e carbonato di calcio (CaCO_3) ed originariamente usato nella industria elettrica (E sta appunto per elettrica) per la sua bassa conducibilità;
- S, utilizzato in applicazioni più impegnative (militari ecc), costituito essenzialmente da silice (SiO_2), allumina (Al_2O_3) e magnesia (MgO) e caratterizzato da elevata resistenza (S sta per strength);

- R infine, più raro, è caratterizzato da resistenza più elevata dei precedenti.

Fiber	Modulus [GPa]	Tensile strength [GPa]	Elongation [%]	Density [g/cc]	Longitudinal Thermal Expansion [$10^{-6}/^{\circ}\text{C}$]	Poisson Ratio	Thermal Conduct [W/m/ $^{\circ}\text{C}$]	Maximum operating Temperature [$^{\circ}\text{C}$]
E-Glass	72.345	3.45	4.4	2.5-2.59	5.04-5.4	0.22	1.05	550
S-Glass	85	4.8	5.3	2.46-2.49	1.6-2.9	0.22	1.05	650
C-Glass	69	3.31	4.8	2.56	6.3	-	1.05	600
D-Glass	55	2.5	4.7	2.14	3.06	-	-	477

Tabella 1.3: Proprietà fisico-meccaniche tipiche di fibre di vetro commerciali [1]

Esistono comunque anche speciali tipi di fibre di vetro utilizzate per scopi particolari, come per esempio il tipo C ed ECR caratterizzati da elevata resistenza alla corrosione e il tipo D caratterizzato da bassa costante dielettrica (vedi tab. 1.3).

Il diametro delle fibre di vetro può variare entro un vasto campo, praticamente tra 0.8 e 25 mm, ed è convenzionalmente indicato mediante una lettera dell'alfabeto, dalla A alla Z. Le fibre usate nella produzione dei PMCs vanno dal tipo G (diametro pari a circa 10 μm) al tipo T (diametro pari a circa 23-24 μm).

Queste lettere sono poi seguite ancora da numeri che indicano il peso ed il numero di singoli fasci di fibre che compongono un trefolo.

In campo aerospaziale viene utilizzato per le parti strutturali il vetro S ad elevata resistenza meccanica.

Il costo di questo materiale, costruito su specifiche severe a causa della unicità del tipo d'impiego, è molto elevato e confrontabile con quello delle fibra aramidiche (Kevlar).

Recentemente è stata messa a punto una variante di questo tipo di fibra di vetro, avente la stessa

composizione chimica, ma di fabbricazione molto più economica perché realizzata su specifiche meno stringenti.

Essa ha infatti un costo pari al 30% circa di quella del vetro S, anche se ha caratteristiche di resistenza meccanica pressoché analoghe. Essa è quindi utilizzabile nella costruzione di parti molto sollecitate, anche se di responsabilità costruttiva meno elevata di quelle richiedenti l'uso del vetro S.

Il tipo di fibra di vetro maggiormente usato commercialmente è il vetro E, il cui costo è pari al 10% di quello del vetro S, con una resistenza meccanica pari a 2/3 rispetto a quest'ultimo.

Esso è utilizzato specificamente nelle applicazioni elettriche come isolante, per la sua bassa conduttività, ma anche largamente nella fabbricazione dei compositi strutturali per la sua stabilità chimica, data dalla presenza in esso dei borosilicati.

Si riportano alcuni dati sperimentali riguardo alle proprietà fisiche e meccaniche di fibre di vetro commerciali:

Fiber	Log 3 forming temperature ^(a)		Liquidus temperature		Softening temperature		Annealing temperature		Straining temperature		Bulk annealed density, glass, g/cm ³	
	°C	°F	°C	°F	°C	°F	°C	°F	°C	°F		
General-purpose fibers												
Boron-containing E-glass	1160–1196	2120–2185	1065–1077	1950–1970	830–860	1525–1580	657	1215	616	1140	2.54–2.55	
Boron-free E-glass	1260	2300	1200	2190	916	1680	736	1355	691	1275	2.62	
Special-purpose fibers												
ECR-glass	1213	2215	1159	2120	880	1615	728	1342	691	1275	2.66–2.68	
D-glass	...	...	...	...	770	1420	...	...	475	885	2.16
S-glass	1565	2850	1500	2730	1056	1935	...	...	760	1400	2.48–2.49
Silica/quartz	>2300	>4170	1670	3038	...	...	...	...	...	...	2.15
Fiber	Coefficient of linear expansion,	Specific heat,	Dielectric constant at room temperature and 1 MHz	Dielectric strength,	Volume resistivity at room temperature	Refractive index	Weight loss in 24 h in 10%	Tensile strength at 23 °C (73 °F)	Young's modulus	Filament elongation at break, %		
	10 ⁻⁶ /°C	cal/g/°C		kV/cm	log ₁₀ (Ω cm)	(bulk)	H ₂ SO ₄ , %	MPa	ksi	GPa	10 ⁶ psi	
General-purpose fibers												
Boron-containing E-glass	4.9–6.0	0.192	5.86–6.6	103	22.7–28.6	1.547	~41	3100–3800	450–551	76–78	11.0–11.3	4.5–4.9
Boron-free E-glass	6.0	...	7.0	102	28.1	1.560	~6	3100–3800	450–551	80–81	11.6–11.7	4.6
Special-purpose fibers												
ECR-glass	5.9	1.576	5	3100–3800	450–551	80–81	11.6–11.7	4.5–4.9
D-glass	3.1	0.175	3.56–3.62	1.47	...	2410	349
S-glass	2.9	0.176	4.53–4.6	130	...	1.523	...	4380–4590	635–666	88–91	12.8–13.2	5.4–5.8
Silica/quartz	0.54	...	3.78	1.4585	...	3400	493	69	10.0	5

Tabella 1.4: Proprietà di fibre di vetro commerciali [1]

Una caratteristica rilevante delle fibre di vetro è la loro notevole resistenza alle sollecitazioni dinamiche d'impatto dovute all'urto di corpi rigidi, che è elevata come quella del Kevlar e sensibilmente più elevata di quella dell'acciaio, che è a sua volta superiore a quella delle fibre di carbonio.

In campo aerospaziale, come anche in quello meccanico in generale, l'uso delle fibre di vetro è molto esteso.

Un uso esteso delle fibre di vetro viene fatto nella costruzione delle pale di elicottero, come ad esempio quelle dell'elicottero sperimentale Boeing 360 avente l'intera struttura realizzata in compositi, con pale in fibre miste di vetro e carbonio grafittico, che sono in grado di tagliare rami di albero di 100 mm di diametro senza subire alcun danneggiamento.

Produzione delle fibre di vetro

Possono essere prodotte due tipi di fibre di vetro: fibre continue e fibre discontinue (a graffetta).

Entrambe le forme vengono create con lo stesso metodo di produzione fino alla fase di stiramento delle fibre.

Elementi indispensabili come la sabbia, il calcare e l'alluminio vengono miscelati a secco e liquefatti in una fornace di materiale refrattario. La temperatura del materiale fuso varia a seconda della composizione del tipo di vetro ma generalmente si aggira attorno ai 1260 °C. Il vetro fuso nel processo di fusione diretta, scorre direttamente nella fornace di stiramento mentre nel processo di marmorizzazione fluisce nella macchina di marmorizzazione. I marmi vengono in seguito rifusi e stirati in fibre. La maggior parte delle fibre di vetro vengono correntemente prodotte attraverso il processo di fusione diretta.

Le fibre di vetro sono ottenute per trafilatura, facendo passare la sostanza fusa attraverso filiere con centinaia di fori. Le fibre continue vengono prodotte introducendo vetro fuso in un connettore di platino dove il vetro fuso passa per gravità attraverso molteplici fori alla base del connettore. Il vetro fuso fuoriesce da ogni orifizio e viene raccolto assieme e assottigliato meccanicamente alle dimensioni volute, viene fatto passare attraverso un leggero spray d'acqua (raffreddamento) e poi viene fatto muovere avanti ed indietro sopra una cinghia che applica un legante protettivo e lubrificante e seleziona le fibre. Il filo viene poi trattato chimicamente in superficie con un trattamento chimico superficiale detto sizing per migliorare le caratteristiche di scorrevolezza, resistenza all'usura abrasiva e d'interfaccia con la matrice.

Segue la riunione di più fili in fasci (strands) e quindi la rimozione dei solventi usati nel sizing mediante essiccazione in forno. Lo strand, che tipicamente consiste di 204 filamenti, viene poi avvolto sopra un alloggiamento (bobina) ad una velocità che può arrivare fino a 50 m/s. Questa "torta" viene poi condizionata o preventivamente asciugata prima di essere trasformata in altre forme tessili.

Fibre selezionate vengono prodotte facendo passare un getto d'aria attraverso gli orifizi alla base del connettore, tirando così singoli filamenti della lunghezza di 20–40 cm dal vetro fuso che esce dai singoli orifizi. Queste fibre vengono raccolte su di un cilindro vuoto ruotante, spruzzate con un legante e raccolte in uno filamento che può essere tirato e attorcigliato in filati.

1.1.4 Fibre di aramide (Kevlar)

Tra le fibre polimeriche quelle di aramide (para-phenyleneterephtalamide, PPD-T) sono le più utilizzate per la costruzione di PMCs strutturali. Esse sono prodotte da varie industrie chimiche e sono note con i rispettivi nomi commerciali di Kevlar® (prodotte dalla Du Pont dal 1972, le più famose), Technora® (prodotta dalla Teijin), Twaron® (prodotta dalla Akzo Nobel), mentre la fibra tessile più usata commercialmente sia come materiale strutturale che per confezionare indumenti speciali è denominata anche Nomex.

I vantaggi delle fibre aramidiche sono: peso specifico ridotto, resistenza e modulo specifici alti, inerzia chimica ed elettromagnetica relativamente buone e di grande importanza una tenacità elevatissima (es. applicazioni balistiche per giubbotti antiproiettile); gli svantaggi sono: accentuata anisotropia delle proprietà (assiale/trasversale > 10), contenute proprietà a taglio e compressione, co-

efficiente di dilatazione termica longitudinale negativo (comporta separazione della matrice e rottura del composito) e temperature di impiego limitate.

Produzione delle fibre di aramide

Il processo industriale di costruzione di questo polimero è articolato nelle seguenti fasi. Il polimero di partenza è costituito dalla miscela di due monomeri: la Fenilendiammina ed il Tereftaloidicloride.

La prima parte del processo di fabbricazione consiste nella polimerizzazione dei monomeri di base, che viene effettuata all'interno di un reattore chimico, in presenza di solventi contenenti cloruri, la quale porta alla formazione di catene molecolari di Poli-p-Fenilenteraftalamide.

Seguono fasi di coagulazione, di estrazione ed essiccazione del polimero mediante le quali esso è separato dal solvente, il quale torna in circolo per essere riutilizzato. La struttura polimerica così ottenuta è costituita da catene rigide ad andamento rettilineo, ma disposte secondo giaciture casuali, nelle quali i gruppi aromatici presenti favoriscono l'irrigidimento "a bastoncino" della catena polimerica stessa, a causa dei doppi legami atomici in essa contenuti, ed anche per un fenomeno di risonanza che conferisce un carattere di doppio legame anche ai legami atomici adiacenti alla catena molecolare principale.

Queste caratteristiche di elevata linearità e rigidità, costituiscono il prerequisito fondamentale sul quale si basano le particolari qualità di queste fibre.

Per ottenere una ottimizzazione delle caratteristiche di resistenza meccanica occorre però dare alle catene polimeriche costituenti delle vere e proprie microscopiche fibre dette fibrille, un andamento generale altamente orientato e parallelo in una stessa direzione.

Questo si realizza con un'ulteriore sequenza di fasi di lavorazione, mediante le quali il polimero secco viene dapprima sciolto in una soluzione acquosa di acido solforico e quindi sottoposto ad una operazione di trafilatura in filiera che consente di ottenere l'allineamento parallelo unidirezionale longitudinale delle fibrille.

I filamenti così ottenuti vengono successivamente resi chimicamente neutri e quindi essiccati e finiti.

Un singolo filamento, avente sezione circolare di diametro 12 micron, è costituito da un fascio di circa un milione di singole fibrille di base paracrystalline, aventi cioè una struttura a livello atomico ordinata e regolare analoga a quella di un solido cristallino, come ad esempio un metallo, e quindi altamente orientata secondo l'andamento del filamento stesso.

Questi filamenti singoli vengono successivamente riuniti in fili, ritorti o meno, costituiti da un numero variabile di filamenti, da poche centinaia fino a qualche migliaio, che vengono poi avvolti su bobine ed avviati all'utilizzazione.

Classificazione e proprietà delle fibre di aramide

Il materiale così ottenuto offre un modulo elastico di resistenza alla trazione E che può essere compreso, nei diversi tipi in commercio, tra 80 e 150 Gpa, con carichi massimi di resistenza a trazione

variabili tra 2,8 GPa, per filati multifilamento, a 3.9 GPa per fili corti fino a 25 mm.

Le proprietà compressive caratteristiche di questo materiale che ne rendono vantaggiosa l'utilizzazione in campo aeronautico e spaziale, ma anche in campo meccanico, sono: l'alta resistenza alle sollecitazioni ($\sigma_r = 3000 - 3800$ MPa) e l'alto modulo di elasticità a trazione ($E = 60000 - 180000$ MPa), valutabili a norme DIN 65356 per i fili ritorti non impregnati, e DIN 65382 per strand impregnati; l'ottima capacità di smorzamento delle vibrazioni, la bassa densità, l'elevata capacità di assorbimento di energia e quindi la resistenza alle sollecitazioni dinamiche d'urto dovuta ad una elevata energia di rottura, e da elevata resistenza alla frattura legata anche alla peculiare struttura fibrillare (vedi Fig. 1.3), e la bassa sensibilità alle sollecitazioni ripetute nel tempo di fatica.

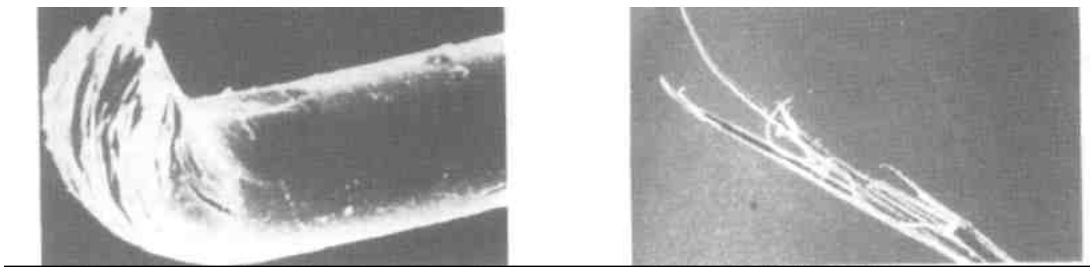


Figura 1.3: Struttura fibrillare delle fibre di aramide: rottura per flessione (a) e trazione (b)

Come le matrici polimeriche, le fibre di aramide presentano una elevata sensibilità all'umidità e agli UV, creep (simile alla fibre di vetro) e bassa temperatura massima di esercizio (max 160°C) che ne limita di fatto l'uso. Ad esempio una esposizione di 200 giorni del filo alla luce solare ne riduce la resistenza meccanica del 50%. Inoltre perde parte delle sue caratteristiche di resistenza meccanica se è imbevuto d'acqua. Conseguentemente esso va protetto da questi agenti esterni, con un sensibile incremento dei costi. Sebbene infatti la temperatura critica è superiore a 375°C , fenomeni ossidativi ne limitano l'uso a temperatura superiori a 160°C circa, specie in presenza di esposizione prolungata.

Tuttavia nel caso dei compositi, la matrice esercita un efficace effetto schermante. Il modulo è meno sensibile alle radiazioni ultraviolette.

Le resine aramidiche sono anche molto apprezzate nella costruzione di radar per la buona trasparenza alle onde elettromagnetiche.

Sono conosciuti tre classi di fibre di aramide:

- (LM), low modulus;
- (IM), intermediate modulus;
- (HM), high modulus.

Le fibre LM sono vendute da Teijin sotto il nome commerciale di Technora T-200, le fibre IM sono vendute da Akzo con il nome Twaron, e le HM sono vendute dalla DuPont sotto il nome Kevlar 140. La densità specifica aumenta da 1.39g/cm^3 per le LM a 1.47g/cm^3 per le HM. La resistenza aumenta da 3.0 GPa per le LM fino a 3.5 GPa per le HM. Il modulo specifico aumenta da 70 GPa per le LM

a 179 GPa per le HM. Il modulo specifico aumenta da 5.1 Mm per le LM a 12.4 Mm per le HM. Il modulo specifico delle fibre di aramide è un'importante proprietà per applicazioni aeronautiche di compositi. E' più alta rispetto a quella delle fibre di vetro, ma minore rispetto alle fibre di carbonio. Le temperature alle quali sono sostenibili applicazioni di fibra di aramide sono di circa 160°C.

Esistono varie formulazioni di fibre aramidiche con caratteristiche fisico-meccaniche diverse, quali le forme denominate in commercio come:

1. Kevlar, usata comunemente per il rinforzo dei pneumatici;
2. Kevlar 29, la più resistente ($\sigma_r = 3800$ MPa circa), usata per il rinforzo di componenti in gomma come cinghie e funi;
3. Kevlar 49, più rigida delle precedenti ($E = 130000$ MPa, $\sigma_r = 3600$ MPa circa), e la più usata per la produzione di PMCs per caschi, elmetti, giubbotti antiproiettile ecc.;
4. Kevlar 149, ancora più rigida della precedente e meno sensibile alla umidità.

Poiché le caratteristiche del Kevlar sono complementari a quelle delle fibre di carbonio, sono stati creati tessuti ibridi che riuniscono entrambe, le fibre con un'orditura in carbonio e quella perpendicolare in Kevlar. Tale tessuto è facilmente identificabile per la differenza di colore dei costituenti. Grazie alla elevata resistenza all'urto ed alla frattura, lamine bidirezionali di aramide sono sovente utilizzate per il rivestimento superficiale dei laminati in fibra di vetro e di carbonio. Le fibre di aramide sono molto più costose e difficili da lavorare delle fibre di vetro e delle fibre di carbonio. Il loro uso è comunque sconsigliato in presenza di elevati sforzi di compressione e flessione in quanto la resistenza a compressione è piuttosto limitata (inferiore al 25% della resistenza a trazione) a causa di un peculiare meccanismo di rottura che porta alla formazione di diffusi e caratteristici difetti nella struttura delle fibre (vedi Fig. 1.4) indicati con il termine anglosassone "kink bands".



Figura 1.4: Kink bands in fibre di aramide soggette a compressione severa.

Riportiamo una tabella delle proprietà di tipiche fibre di aramide commerciali:

Proprietà	Arenka	Arenka HM	Kevlar 29	Kevlar 49
densità (g/cm ³)	1,44	1,45	1,44	1,44
Modulo elastico (Mpa)	61000	125000	62000	124000
Resistenza a trazione (MPa)	2700	2700	2700	3600
Allungamento (%)	3,7	2,3	3,4	2,8
Coefficiente di dilatazione termica assiale (10 ⁻⁶ /°K)	-2,0	-2,0	-	-

Tabella 1.5: Proprietà delle fibre commerciali di Arenka e di Kevlar

Kevlar-49 è una fibra di aramide di tipo HM, che è disponibile in 11 misure di yarn e quattro di roving, come mostrato in Tab. 1.6. Gli yarn sono prodotti multifilamento che vengono filati direttamente durante la manifattura della fibra e possono essere composti da un range di filamenti che va da 25 (yarn finissimo) a 1333 (yarn più spesso). Rovings sono prodotti combinando la fine degli yarns in un processo simile a quello usato per la produzione della fiaba di vetro. Il denaro, unità di misura tessile di densità lineare, è il peso in grammi di 9000 m di yarn o roving (1 denier = 1.111×10^{-7} kg/m). La Tab. 1.7 elenca le misure disponibili di yarn e roving di Kevlar 29, il quale ha modulo elastico minore di quello del Kevlar 49 ed è usato estensivamente nelle armature balistiche, ricopritture d'amianto, ed in certi compositi quando è desiderata grande tolleranza al danneggiamento. Il Kevlar 149, con un modulo elastico più alto del 25-40% rispetto al Kevlar 49, è disponibile in yarn a 1420 denari.

Denier	Yield		Number of filaments
	m/kg	yd/lb	
55	163,636	81,175	25
195	46,155	22,895	134
380	23,684	11,749	267
720	12,500	6,200	490
1,140	7,895	3,916	768
1,420	6,388	3,144	1,000
1,860	4,877	2,400	1,000
2,160	4,225	2,097	1,000
2,450	3,673	1,822	1,333
2,840	3,169	1,572	1,333
4,560	1,973	980	3,072
5,680	1,585	786	2,666
7,100	1,268	630	5,000
8,520	1,056	524	3,999

Tabella 1.6: Kevlar 49 yarn e dimensione dei roving [3]

Denier	Yield		Number of filaments
	m/kg	yd/lb	
200	45,000	22,320	134
400	22,500	11,160	267
600	15,000	7,440	400
720	12,500	6,200	500
840	10,714	5,314	560
850	10,588	5,252	560
900	10,000	4,960	500
1,000	9,000	4,464	666
1,500	6,000	2,976	1,000
2,250	4,000	1,984	1,000
3,000	3,000	1,488	1,333
15,000	600	298	10,000

Tabella 1.7: Kevlar 29 yarn e dimensione dei roving [1]

Proprietà chiave di alcune fibre di aramide sono date nella Tab. 1.8. Kevlar 49 è la forma di fibra di aramide predominantemente usata in compositi strutturali a causa del suo alto modulo elastico. Il Kevlar 29 è usato in compositi quando sono desiderate grande tenacità, tolleranza al danneggiamento e prestazioni antiproiettile. E' disponibile anche la fibra Kevlar 149, al elevatissimo modulo.

Material	Density, g/cm ³	Filament diameter		Tensile modulus ^(a)		Tensile strength ^(a)		Tensile elongation, %	Available yarn count, No. filaments
		µm	µin.	GPa	10 ⁶ psi	GPa	10 ⁶ psi		
Kevlar 29 (high toughness)	1.44	12	470	83	12	3.6 2.8 ^(b)	0.525 0.400 ^(b)	4.0	134–10,000
Kevlar 49 (high modulus)	1.44	12	470	131	19	3.6– 4.1	0.525– 0.600	2.8	25–5,000
Kevlar 149 (ultrahigh modulus)	1.47	12	470	179	26	3.4	0.500	2.0	1,000

(a) ASTM D 2343, impregnated strand

(b) ASTM D 885, unimpregnated strand

Tabella 1.8: Proprietà di alcune fibre di aramide [1]

Andando a considerare le proprietà in condizioni di *elevata temperatura ed umidità*, si può osservare che yarns di aramide HM mostrano una diminuzione lineare sia della resistenza a trazione che del modulo elastico quando testato ad elevate temperature in aria (Fig. 1.5). Più dell'80% delle proprietà sono mantenute fino ad una temperatura di 180 °C.

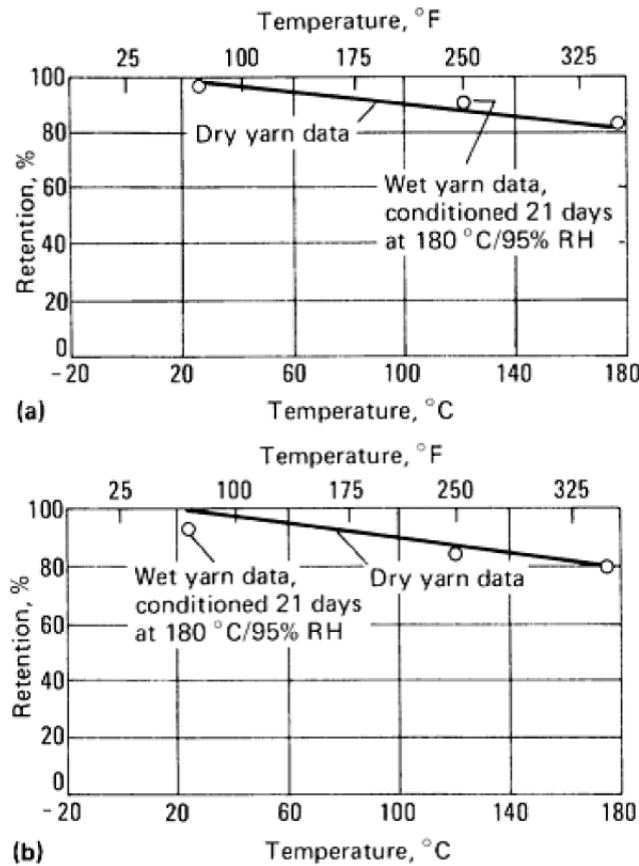


Figura 1.5: Effetto della temperatura sulla resistenza a trazione (a) e modulo (b) di yarn di aramide Kevlar 49 secchi e umidi

Riguardo alla resistenza a *creep* ed a *fatica* le fibre di aramide presentano una buona resistenza (Fig. 1.6, 1.7). Il creep rate è basso e simile a quello delle fibre di vetro, ma al contrario di queste la fibra di aramide è meno suscettibile alla rottura per creep.

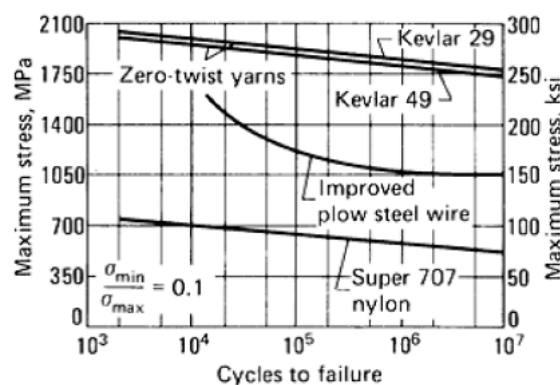


Figura 1.6: Resistenza a fatica di fibre di aramide

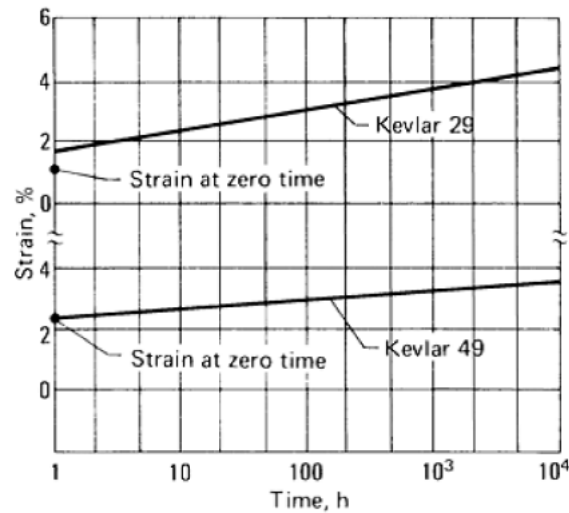


Figura 1.7: Creep in Kevlar 29 e Kevlar 49 al 50% della resistenza a rottura

Riguardo alle *proprietà in compressione*, anche se le fibre di aramide rispondono elasticamente in tensione, esse presentano un comportamento non lineare e duttile. Ad una deformazione in compressione del 0.3 - 0.5 % si può osservare un cedimento (Fig. 1.8). Questo è dovuto alla formazione di difetti strutturali noti come kink bands, che sono da attribuire a fenomeni di instabilità a compressione delle molecole di aramide. Come risultato di questo comportamento a compressione, l'utilizzazione di fibre di aramide in applicazioni che sono soggette ad alte deformazioni di compressione o carichi in flessione è limitata. Le caratteristiche di microbuckling hanno anche portato allo sviluppo di strutture di assorbimento urto che sfruttano il fenomeno di sicurezza intrinseca delle fibre di aramide sotto prolungati alti carichi in compressione.

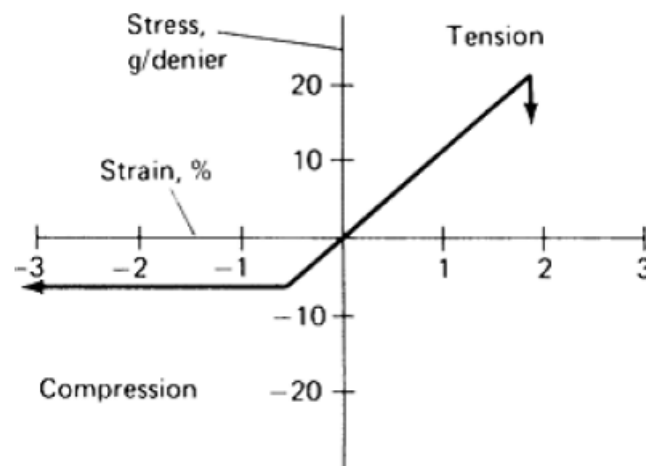


Figura 1.8: Comportamento tensione-deformazione in trazione e compressione di fibre di aramide

Le fibre di aramide sono note per la loro *elevata tenacità* e caratteristiche di generale tolleranza al danneggiamento. In parte ciò è attribuibile direttamente alla convenzionale tenacità a trazione (area sottesa dalla curva tensione deformazione). Per tenacità in questo ambito si intende anche la resistenza

all'impatto ed il potere antiproiettile. La struttura fibrillare delle fibre di aramide ed il comportamento a compressione contribuiscono al fatto che il composito sia meno sensibile alle indentazioni e che ceda in maniera duttile, non fragile e non catastrofica, al contrario di fibre di vetro e di carbonio.

In riferimento alle *proprietà termiche* la struttura aromatica dell'aramide impartisce un alto grado di stabilità termica (1.9). Le fibre da PPD-T non hanno un punto di fusione letterale o una temperatura di transizione vetrosa (T_g) (stimata a $\geq 375^\circ\text{C}$), come normalmente osservato con altri polimeri sintetici. Esse decompongono in aria a 425°C e sono inerentemente resistenti alla fiamma (limiting oxygen index di 0.29). Il range di temperatura di utilizzo di fibre di aramide si attesta all'incirca tra -200 e $+200^\circ\text{C}$, ma non sono generalmente usate in modo prolungato a temperature superiori a 150°C a causa dell'ossidazione. Le fibre di aramide presentano un coefficiente di espansione termica leggermente negativo di $-2 \times 10^{-6}/\text{K}$ e di espansione trasversale positivo di $60 \times 10^{-6}/\text{K}$.

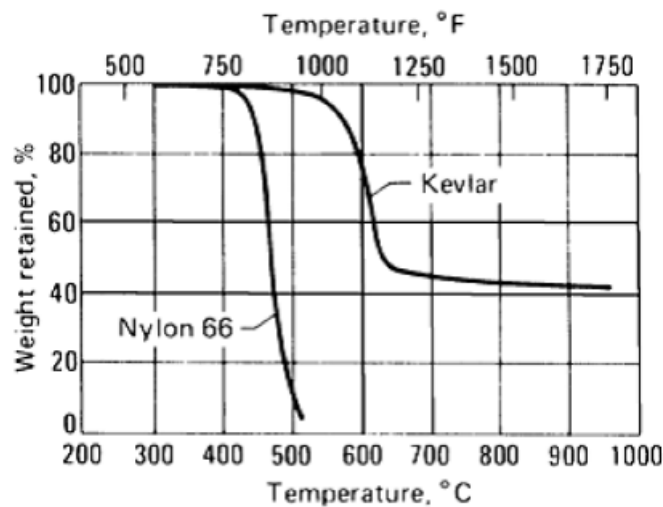


Figura 1.9: Stabilità termica; analisi termogravimetrica per $20^\circ\text{C}/\text{min}$ in azoto

1.1.5 Formato di fibre per compositi

Le fibre descritte possono essere utilizzate in tanti modi diversi in termini di dimensioni, quantità, orientazioni e direzioni nello spazio; il complesso di tali diverse possibilità è stato in qualche modo normalizzato, indicando come “formato” delle fibre il coacervo di tali possibilità. Qui di seguito si esamineranno i diversi e possibili formati commerciali disponibili.

Fili e filati

I fili possono essere di tipo:

- monobava o pluribava (a capo unico, ritorti, binati)
- a fibra corta (naturale) o filamento continuo (sintetiche)
- paralleli, testurizzati o intrecciati

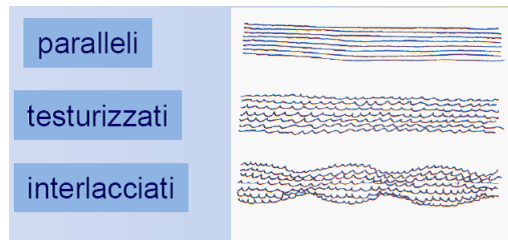


Figura 1.10: Tipi di filati

I filati cotonieri possono essere di tipo:

- pettinati (i più lisci), cardati o rigenerati
- ritorti (Z = a destra, S = a sinistra)

I fili hanno struttura regolare, più compatta e liscia rispetto ai filati. Morbidezza e flessibilità vengono aumentate aumentando la finezza delle singole fibre (fino a 6,5 micron).

Mat e tessuti

Sulla base dell'integrità strutturale, della linearità e della continuità, l'architettura delle fibre può essere classificata in 4 formati o categorie: discreta, continua lineare, bidimensionale o laminare e tridimensionale. Nella prima categoria rientrano i whiskers e i mat (o feltro), in cui le fibre non hanno continuità nel materiale e inoltre non sono orientate.

La seconda categoria, costituita dalle fibre continue (unidirezionali o meno), ha un alto livello di continuità e linearità presentando il più alto livello di efficienza delle proprietà tensili. L'inconveniente dei compositi realizzati con tali architetture è la loro debolezza interlaminare, dovuta alla mancanza di raccordi tra una lamina e l'altra.

La terza categoria è costituita da un sistema planare bidimensionale; anche in questo caso si presenta lo stesso problema di debolezza interlaminare delle fibre continue dovuto essenzialmente alla mancanza di fibre disposte lungo la terza direzione dello spazio (quella dello spessore).

La quarta categoria presenta fibre orientate in 3D con filamenti continui a formare una rete di fili in strutture integrate. Gli aspetti più interessanti delle strutture integrate sono certamente i rinforzi che queste presentano nella direzione del loro spessore così da non presentare la caratteristica debolezza interlaminare che invece caratterizza le strutture mono- e bi-dimensionali; inoltre questi grazie all'enorme versatilità delle strutture integrate possono con facilità assumere anche forme complesse.

Nella Fig. 1.11 è mostrata la classificazione appena esposta.

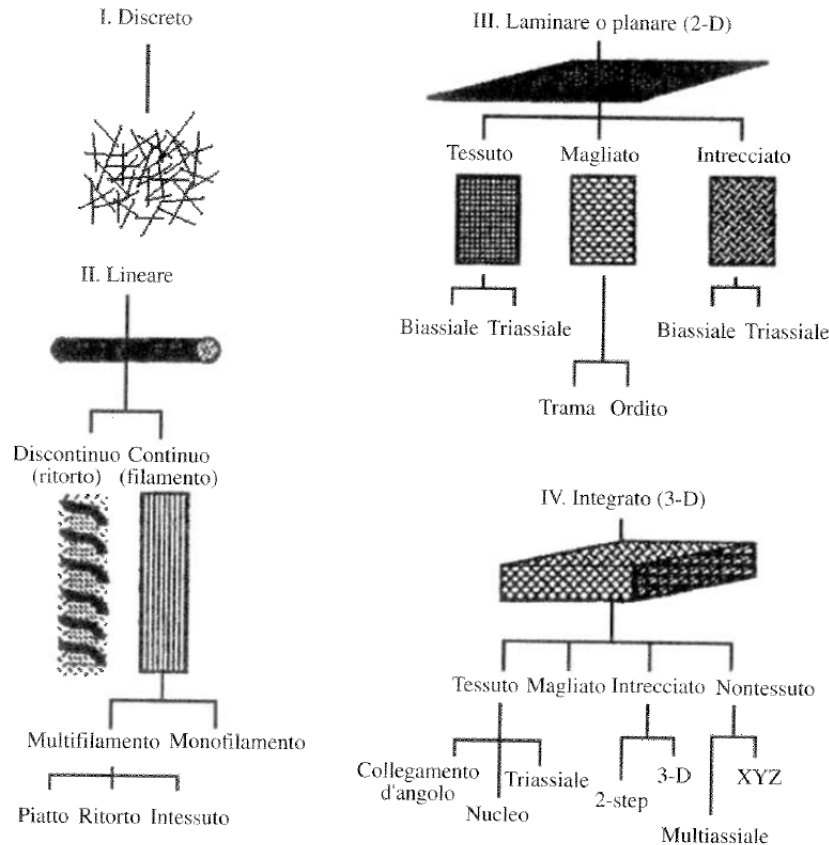


Figura 1.11: Architettura delle fibre per compositi [2]

Le ragioni che suggeriscono lo studio, l'analisi e la scelta dei diversi formati per strutture in materiale composito sono mirate al raggiungimento di:

- semplicità di adattamento a geometrie complesse
- facilità di manipolazione
- ridotti costi di processo
- miglioramento di tolleranza e resistenza al danno

Il mat Il mat è costituito da fili di fibre (roving) tagliati (chopped strand mat) o continui (continuous strand mat), distribuiti in maniera casuale in un piano e tenuti insieme da un "appretto" in modo da formare un feltro arrotolabile. Con tale materiale si producono strati con eguali proprietà lungo gli assi x e y, e con una buona resistenza al taglio interlaminare.

Nastri unidirezionali I nastri unidirezionali hanno bassa resistenza nella direzione normale a quella delle fibre; ogni tentativo di stiramento sulle superfici a geometria complessa potrebbe provocare la rottura del nastro (tape-splitting), ed è quindi necessario disporre di un elevato numero di tipologie di tessuti.

Tessuti (wave) Il modello di riferimento per la strutturazione di un tessuto è un sistema di coordinate X-Y in cui l'asse X rappresenta la lunghezza del rotolo di fibra ($30 \div 150$ m), noto come direzione di ordito; l'asse Y, invece, rappresenta la lunghezza del tessuto ($0,9 \div 3$ m) ed è nota come direzione di trama.

I tessuti vengono prodotti intrecciando i fili di ordito (0°) e di trama (90°) con uno schema regolare detto “armatura”. L'integrità del tessuto è garantita dalla concatenazione meccanica dei fili.

Le tipologia di armatura principali sono:

- Tela (plain)
- Spina o saia (twill)
- Raso (satin)

La tessitura di tipo *plain-wave* è il più comune schema di tessitura noto come “tela”, caratterizzato da fili di trama e ordito interfacciati in maniera regolare e periodica con spaziatura unitaria.



Figura 1.12: Armatura di tipo Plain-Wave

Le principali caratteristiche dei tessuti così ottenuti sono:

- uguale quantità di fili di ordito e trama su entrambi i lati del tessuto;
- moderato *fiber crimp*: curvatura o deformazione generata dalla sovrapposizione di trama e ordito; questo genera una limitazione della rigidità e resistenza del composito in conseguenza di applicazione di un carico di trazione.

Il tessuto è simmetrico con ottima stabilità. Tuttavia è l'armatura che garantisce la minore drappabilità e l'alto livello di legatura determina caratteristiche meccaniche relativamente basse rispetto alle altre armature. Con gli alti titoli questa armatura piega eccessivamente le fibre pertanto si tende a non usarla per tessuti molto pesanti.

La tessitura di tipo *basket* o *twill-wave* è una variante del *plain-wave* nella quale trama e ordito sono interfacciati con periodicità doppia. Ciò produce sul tessuto l'effetto di una “costa” diagonale

continua o spezzata. Rispetto alla tela, la spina ha caratteristiche superiori di bagnabilità e drappabilità con solo una perdita minima di stabilità. Grazie ad una minore legatura, il tessuto presenta una superficie più soffice e caratteristiche meccaniche leggermente superiori. Si ottiene cioè una riduzione del *fiber crimp* e quindi un più elevato valore delle proprietà meccaniche nel piano del laminato composito.

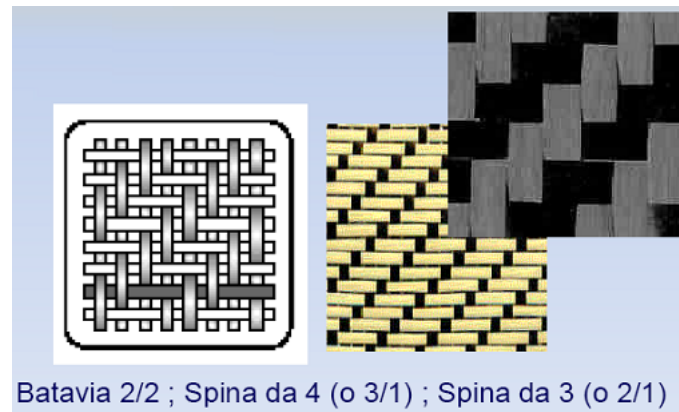


Figura 1.13: Armatura di tipo Twill-Wave

Infine, con i tessuti di tipo *n-satin weaves*, si individua una famiglia con un numero sempre minore di punti di interlacciamento tra i fili: la sovrapposizione della trama sull'ordito, per esempio può avvenire ogni n fili di ordito, con n variabile tra 3 e 8. In tal modo si può scegliere il tessuto più adatto alla specifica applicazione.

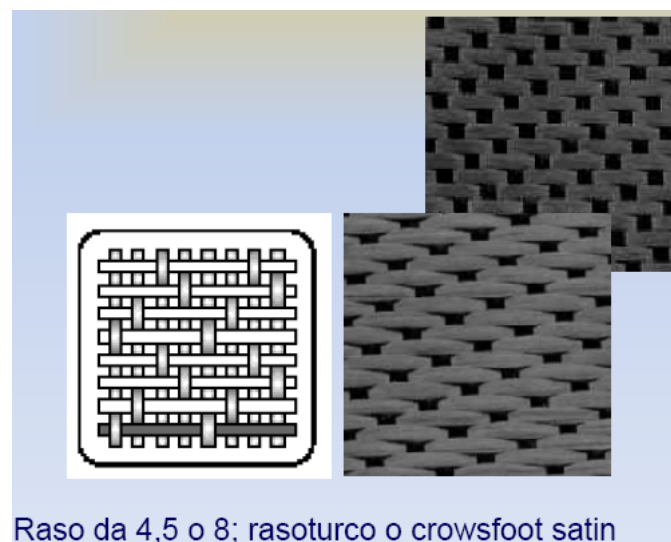


Figura 1.14: Armatura di tipo Satin-Wave

Il raso turco è una forma di raso con un diverso sfalsamento nello schema. Le armature “raso” sono molto piatte, presentano una buona bagnabilità ed un alto livello di drappabilità. Il basso livello di legatura fornisce buone caratteristiche meccaniche. Questo tipo di armatura permette il massimo contatto tra i fili e quindi tessuti molto chiusi. Si devono tenere in considerazione la bassa stabilità e

l'asimmetria, che fa sì che da un lato del tessuto i fili vadano prevalentemente in direzione dell'ordito, mentre dall'altra siano prevalentemente in direzione della trama. Si deve fare attenzione nel sovrapporre più strati di questi tessuti per assicurarsi che non si creino tensioni nel manufatto finale a causa di questo effetto asimmetrico.

Si è accennato in precedenza alla adattabilità del tessuto a disporsi su superfici di geometria complessa. Questa proprietà è definita con il termine anglosassone *drapeability*. Può essere descritta ricorrendo al numero di interlacciamenti per unità di area del tessuto: all'aumentare di tale numero, aumenta la "drappabilità". Infatti, un maggiore grado di interconnessione tra i fili del tessuto ne favorisce la conservazione delle caratteristiche dell'architettura tessile all'atto della deformazione operata per modellare il tessuto sulla geometria dello stampo. Si comprende come la drappabilità sia una proprietà che contrasta con il mantenimento della linearità delle fibre nel tessuto, che restituisce maggiori proprietà meccaniche nel piano del laminato.

La drappabilità (capacità di un tessuto di conformarsi ad una superficie complessa), la morbidezza della superficie e la stabilità del tessuto dipendono principalmente dal tipo di armatura. Il peso (g/m^2), l'apertura del tessuto e, in misura minore, la bagnabilità sono determinate dalla scelta della corretta combinazione del titolo del filato e del numero di fili al centimetro.

Per i tessuti satin le proprietà meccaniche sono generalmente soddisfacenti nelle due direzioni del piano del tessuto.

Il tradizionale manufatto in materiale composito è realizzato nella forma del laminato, avente lamine sovrapposte e legate tra loro; tali lamine possono differenziarsi in base a vari fattori, il principale dei quali nella quasi totalità dei casi industriali di interesse è l'orientazione delle fibre nel piano delle singole lamine.

Per *titolo* di un filato si intende il peso per unità di lunghezza:

- TEX = massa in grammi di 1000 m di filato
- DEN (denaro) = massa in grammi di 9000 m di filato ($1 \text{ TEX} = 0,111 \text{ DEN}$) ($1 \text{ den} = 1.111 \times 10^{-7} \text{ kg/m}$)
- Carbonio: titolo in migliaia di microbave $K=1000$ bave ($12K = 800 \text{ tex}$ per filati HS)

Per *sizing* si intende l'appretto applicato alla superficie del filo che ne migliora la conservazione e lavorabilità, migliorando nel contempo le caratteristiche meccaniche favorendo l'interfaccia resina-filato.

Per *riduzione* si intende il numero di fili al cm in trama ed ordito.

Per *ratio* si intende:

- nei tessuti sbilanciati (UD) il rapporto tra i pesi di trama e ordito
- nei tessuti ibridi il rapporto tra i pesi dei filati componenti

La classificazione commerciale dei rinforzi a base di fibra si basa sulla indicazione della *grammatura* dei tessuti. Per grammatura si intende il peso specifico di superficie, indicato in g/m^2 ("cc"), di un

tessuto. Un rinforzo in fibra di carbonio di grammatura 200 cc avrà un contenuto in fibra minore di uno con grammatura 400 cc. Esiste una stretta correlazione tra spessore del tessuto e grammatura, vale generalmente la relazione:

$$S = \text{grammatura} / 1000 \text{ [mm]}$$

Generalmente vengono utilizzati tessuti con grammatura maggiore per componenti strutturali non in vista e con grammatura inferiore per parti di elevata importanza estetica. Questo perché un tessuto con grammatura ad esempio 200 cc presenta una tessitura più fine e piana rispetto ad una grammatura 400 cc.

Di rilievo è anche la classificazione per numero di fibre che costituiscono i singoli yarn. Un tessuto 12 K presenta yarn formati da 12000 filamenti. Tessuti con yarn 3K hanno costi ovviamente maggiori di tessuti di yarn 12K, in quanto per la realizzazione della stessa metratura gli yarn devono essere intrecciati un maggior numero di volte. Da osservare che esistono vincoli di tipo di yarn nella realizzazione di alcuni tipi di grammature. Per esempio una grammatura 200 cc per resa estetica può essere formata da yarn costituiti da un numero di fibre $\leq 3K$, in quanto yarn dal diametro maggiore non permetterebbero una tessitura dalla elevata resa estetica. Rinforzi strutturali in fibra per resa estetica di qualità sono quindi più costosi.

La Fig. 1.15 mostra la qualità del trasferimento delle proprietà da fibra a tessuto per i diversi tipi di armatura e titoli di fibra. Si nota come l'armatura satin garantisca prestazioni superiori rispetto a twill e plain a causa del minor grado di curvatura delle fibre, e come tendenzialmente le proprietà meccaniche calino all'aumentare del titolo della fibra (effetto dimensionale). Titoli minori di 3K non sono generalmente commercializzati.

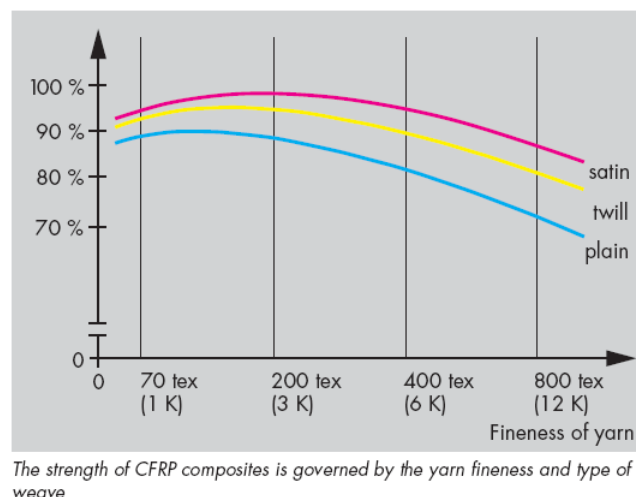


Figura 1.15: Trasferimento delle proprietà da fibra a tessuto (Gurit)

1.1.6 Codice di orientazione del laminato

Ogni diverso tipo di ordine di laminazione rende uniche le proprietà e le caratteristiche di un laminato che di conseguenza deve essere identificato univocamente. Una chiara identificazione è data dallo Standard Laminate Code, il quale specifica nel modo più conciso possibile:

1. l'orientazione di ogni lamina rispetto ad un asse di riferimento del laminato finale (asse x)
2. il numero di lamine ad ogni orientazione
3. la esatta sequenza geometrica delle lamine

Lo Standard Laminate Code assume che ogni lamina sia identica in spessore e proprietà. Per l'identificazione di laminati ibridi sono utilizzate notazioni specifiche.

Standard Laminate Code

1. Ogni lamina è denotata da un numero che rappresenta l'angolo in gradi tra la direzione longitudinale della lamina stessa (direzione delle fibre per unidirezionali, direzione longitudinale della lamina per wave) e l'asse x del laminato
2. Singole lamine adiacenti sono separate da una barra slash se sono angolate diversamente
3. Le lamine sono elencate in sequenza secondo il loro ordine da una faccia del laminato all'altra, partendo dalla prima lamina del lay-up, con parentesi quadre indicanti l'inizio e la fine del codice
4. Lamine adiacenti aventi la stessa orientazione sono denotate da un pedice numerico

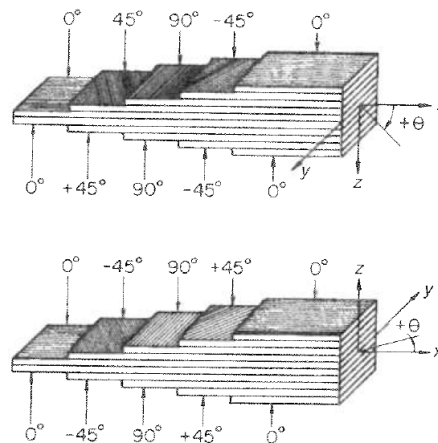


Figura 1.16: Convenzione dei segni per il Standard Laminate Code

Laminati simmetrici

I laminati che posseggono simmetria nell'orientazione delle lamine nei confronti del piano medio geometrico richiedono la specifica di solo metà della sequenza di laminazione. Infatti si elencano le lamine in sequenza con un numero pari di lamine, partendo da una faccia e fermandosi al piano medio. Il pedice S alle parentesi indica che solamente metà del laminato è descritto, con l'altra metà simmetrica rispetto al piano medio.

$$[90/0_2/45]_s$$

Laminati simmetrici con un numero di lamine dispari sono codificati allo stesso modo dei laminati simmetrici pari, ad eccezione della lamina centrale, elencata per ultima e marcata da una linea superiore.

$$[0/45/90]_s$$

Sets

Ripetizioni della sequenza del laminato sono chiamate sets e sono racchiuse in parentesi. Ogni set è codificato in accordanza delle stesse regole che vengono applicate alla singola lamina.

$$[(45/0/90)_2]_s \text{ oppure } [45/0/90]_{2s}$$

$$[(45/0/90)_4] \text{ oppure } [45/0/90]_4$$

Laminati ibridi

Quando ci si riferisce a laminati ibridi, il codice standard è parzialmente modificato. Le modifiche generalmente consistono nell'aggiunta di una serie di pedici alle indicazioni delle angolazioni che vanno a designare non solo l'angolazione, ma anche il materiale costituente di ogni lamina. Da annotare è però che non è compito dello Standard Laminate Code definire lo specifico sistema di materiale, per i laminati sia ibridi sia non ibridi. Il codice per laminati ibridi è illustrato nella figura seguente:

$$[0_B/\pm 45_{Gr}/90_{Gr}]_s$$

1.1.7 Preforme in 3D

La tecnologia dei compositi cosiddetti *tessili* prevede una modifica dell'intero approccio, sia progettuale sia tecnologico, alle questioni inerenti la realizzazione di prodotti in materiale composito con matrici polimeriche termoindurenti.

La considerazione del materiale composito quale efficiente materiale strutturale non cambia quando si considera un composito cosiddetto tessile, cioè costituito principalmente con fibre in formato di tessuti di vario tipo. Le funzioni di resistenza sia a carichi primari sia secondari possono essere assolte con grande efficacia dai compositi tessili allo stesso modo dei laminati puri: chiaramente in essi permangono le notevoli proprietà di resistenza e rigidità in rapporto al peso. E' possibile affermare che l'architettura delle preforme tessili offre uno strumento in più al progettista nella ricerca della giusta combinazione di materiale, struttura e forma tesa al raggiungimento della migliore performance. L'ingegneria dei materiali compositi prende in prestito molte strutture presenti in natura, la quale insegna l'opportunità di creare oggetti la cui forma esterna è in stretta sinergia con il formato

interno del materiale costituente, nel comune intento di rispondere alle specifiche sollecitazioni che interverranno lungo tutta la vita utile dell'elemento. Un punto di debolezza che i compositi in tessuto, generalmente, condividono con i laminati non tessuti è quello nei confronti dei danneggiamenti da delaminazione, classico tipo di rottura che caratterizza i compositi commerciali di larga scala. Da ciò scaturisce l'esigenza di disporre di architetture di rinforzo di tipo tridimensionale (3D), capaci di offrire migliori caratteristiche di resistenza a carichi esterni con configurazioni complesse. Punto di riferimento in letteratura è rappresentato da [2].

Le preforme di rinforzo 3D costituiscono il prodotto di tecnologie molto speciali, e sono intese rispondere proprio all'esigenza citata. La loro storia è iniziata, come spesso accade per le tecnologie altamente innovative, nel campo delle applicazioni aerospaziali, con particolare riferimento alla realizzazione di elementi sicuramente critici per i sistemi concepiti ed utilizzati nella attività del settore. Ugelli di spinta, bordi d'attacco alari, castelli-motore, sezioni terminali di prua hanno infatti trainato lo sviluppo di questa tecnologia, stimolando lo studio e la soluzione di problemi strutturali connessi con l'insieme unico di estreme sollecitazioni termiche e meccaniche cui essi normalmente sono sottoposti in maniera congiunta.

Anche se le proprietà meccaniche del classico laminato composito sono soddisfacenti nelle due direzioni contenenti il tessuto di rinforzo, le proprietà meccaniche nella terza direzione dove la matrice domina è tipicamente inferiore di più di un ordine di grandezza rispetto alla direzione del rinforzo. Questo problema è specialmente critico in applicazioni caratterizzate da elevati stress termici. La ovvia soluzione è aggiungere fibra di rinforzo lungo la terza direzione e lungo direzioni ulteriori se necessario, cercando di realizzare materiali compositi attraverso un approccio isotropo quale quello dei metalli. Con lo sviluppo delle tecniche di realizzazione di rinforzi multidirezionali oggi si progettano e si realizzano macchine semiautomatiche con lo scopo di ridurre i costi delle preforme e di aumentarne la qualità attraverso l'eliminazione degli errori potenziali associati alle attività di assemblaggio manuale. Ad oggi sono operanti tessitrici tridirezionali completamente automatiche e controllate elettronicamente.

Classificazione e proprietà: intessuti - non ondulati - magliati - intrecciati

Nello studio di preforme di rinforzo in tessuto per materiali compositi, è possibile effettuare vari tipi di classificazioni, in base alla considerazione di dimensioni spaziali coperte dalle fibre, direzioni delle fibre nella superficie della preforma, lunghezza delle fibre, ma soprattutto in base al metodo di tessitura.

La classificazione principale è quindi da attuare in base al metodo specifico utilizzato per realizzare i tessuti. Essi possono essere:

1. intessuti;
2. non ondulati;
3. magliati (knitted);

4. intrecciati (braided).

Come è facile intuire, la classificazione mostrata si basa sostanzialmente su strutture di derivazione bidimensionale, la cui nascita è dovuta alla ricerca di metodi che consentissero di operare la laminazione di qualunque manufatto in maniera poco dispendiosa, dal punto di vista della mano d'opera impiegata. Infatti, appare immediatamente evidente ed è ben nota la difficoltà di realizzare qualunque laminato, partendo dalla disposizione dei singoli roving (fili) di fibre nella configurazione desiderata: questo accade solo con l'utilizzo di tecnologie altamente automatizzate e limitate alla realizzazione di geometrie semplici. Si tratta di forme assialsimmetriche, se si pensa al Filament Winding, a profilati con una dimensione prevalente, per la pultrusione, a forme leggermente più complesse per l'overbraiding. Oppure il processo avviene con elevatissimi costi operativi, come nel caso dell'autoclave dove, tuttavia, i roving di fibre sono raccolti in nastri preimpregnati di varia grammatura. Senza considerare necessariamente il lay-up (deposizione) manuale, che ancora gioca una parte di grande importanza nelle produzioni di largo consumo, anche tecnologie differenti da quelle citate, come per esempio quella del sacco in pressione, traggono dal vantaggio dal disporre di preforme di sole fibre tessute da impregnare per la realizzazione del pezzo finito.

Esiste, però, un effetto indesiderato che l'utilizzo di preforme in tessuto, in luogo di lamine puramente unidirezionali sovrapposte con sequenze ben definite, produce. Qualunque tipo di tessuto viene realizzato tramite uno schema di mutua interconnessione dei roving di fibre. Questo porta le fibre di rinforzo a perdere la propria originaria linearità, e tale aspetto si mantiene ovviamente inalterato nel composito. Il problema che si pone, quindi, è quello della frazione di proprietà meccaniche iniziali delle fibre trasferita efficacemente al composito, una volta che la preforma sia stata definitivamente inglobata nella matrice (proprietà di *trasferimento*).

Tutte le considerazioni appena fatte si applicano invariabilmente ai tessuti 2D e alle preforme 3D.

Ognuna delle strutture classificate è un tentativo di mediazione tra le buone caratteristiche meccaniche finali del prodotto e la facilità di produzione del manufatto, con una tendenza maggiore verso l'uno o verso l'altro estremo nel passaggio da una struttura all'altra. Quella di più immediata e naturale concezione è di sicuro la preforma *intessuta*, con le sue varianti - *plain* e *twill weave* e tutti gli *n-harness satin* (con *n* che assume valori da 3 a 8). La caratteristica principale di tale preforma è la sua spiccata anisotropia (avendo fibre disposte sostanzialmente nelle uniche due direzioni principali del piano), che ovviamente viene ritrovata nelle caratteristiche finali del composito. Allo scopo di conferire alla struttura un incremento di prestazioni meccaniche anche in diverse direzioni, vengono realizzati tessuti a ordito *tridirezionale*, nei quali i roving sono disposti secondo tre direzioni del piano, equispaziate nella loro mutua angolazione: questo tipo di tessitura produce anche l'effetto di migliorare sensibilmente la debole risposta della struttura alle sollecitazioni di taglio parallelamente al piano della lamina.

Nel caso tridimensionale (woven 3D) nella sua concezione di base la preforma presenta un ordine di roving disposti parallelamente in un'unica direzione (asse Z) a costituire l'ordito 3D; essi vengono poi interconnessi con i roving costituenti la trama 3D, detta *trama multipla*, i quali completano la struttura multistrato attraverso il collegamento contemporaneo sia tra i roving di uno stesso piano XY

sia tra i roving di piani paralleli posti a quote Z diverse. E' la cosiddetta struttura *completamente integrata*, particolarmente indicata per manufatti dalla geometria esterna semplice e con sezione retta piena. La connessione tra diverse lamine può essere effettuata anche tramite uno o più fili di grammatura inferiore a quella dei fili principali del tessuto; come si dirà più avanti, questa configurazione è sufficiente a creare un ottimo rinforzo della struttura nella terza dimensione.

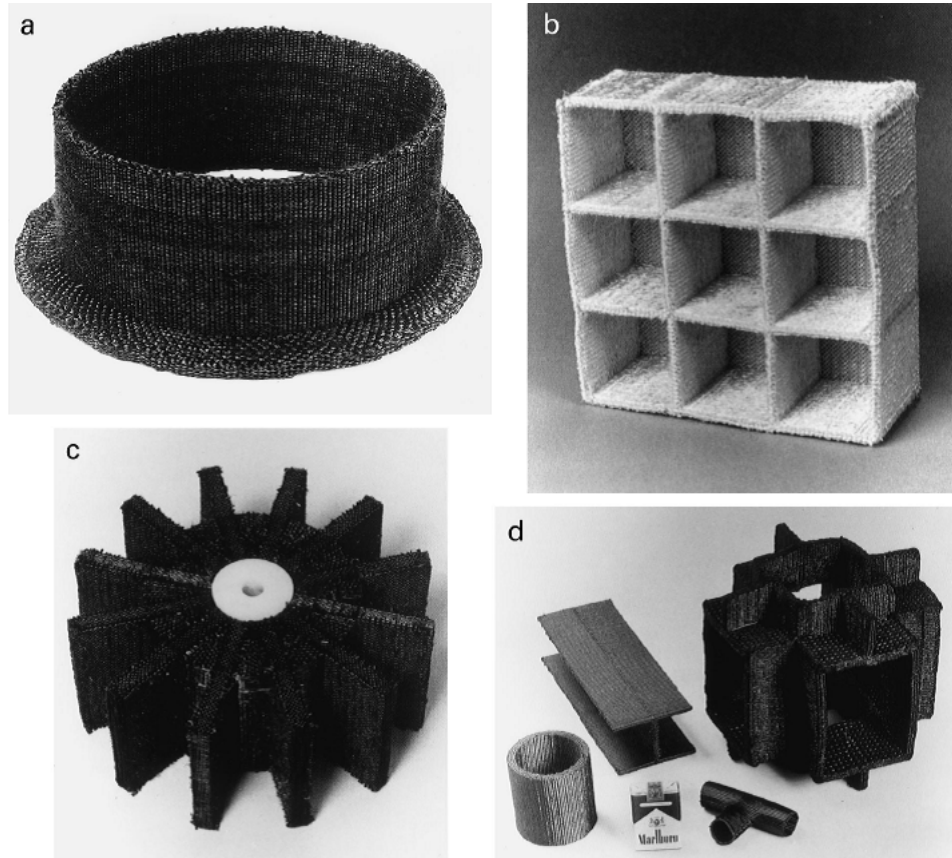


Figura 1.17: Examples of 3D woven preforms: (a) cylinder and flange; (b) egg crate structures; (c) turbine rotors woven by Techniweave Inc.; and (d) various complex shapes woven by Shikishima Canvas Co., Ltd. (Courtesy of the Techniweave Inc. and Shikishima Canvas Co. Ltd.) [3]

Nel caso iniziale 2D (ma non di meno nel caso 3D), la preforma intessuta presenta notevoli limitazioni, sia dal punto di vista delle proprietà trasferite al materiale finale (a causa dell'ondulazione dei roving di fibre, sia della adattabilità offerta all'operatore nel modellare la lamina sullo stampo) per via della rigida trama di mutua interconnessione dei roving. In considerazione di tale evenienza, gli altri tipi di tessuto elencati migliorano l'una o l'altra delle due citate caratteristiche.

I tessuti *non ondulati* vanno ovviamente nella direzione della preservazione delle proprietà meccaniche delle fibre, non alterandone la linearità in sede di fabbricazione della preforma (es. Dynanotech di Angeloni). Nel caso 2D, la struttura si presenta non dissimile dalla geometria di un qualunque laminato puro, con lamine che presentano orientazioni diverse qualunque nel piano (i *multiassiali*); l'unica variante è costituita dalla connessione permanente (anche "a secco") delle varie lamine, realizzata con un filo unico (spesso di materiale polimerico, generalmente termoplastico) che attraversa le lamine in punti regolarmente spazati, così da formare quello che viene generalmente detto *stitching*

(cucitura), o anche *knitting* (magliatura) a indicare il tipo di trama disegnata dalla cucitura stessa. I multidirezionali sono quindi costituiti da due o più strati di fili unidirezionali e paralleli, sovrapposti e cuciti insieme. La disposizione rettilinea e non intrecciata dei fili, consente di eliminare i punti di stress meccanico localizzati nelle intersezioni tra trama ed ordito nei tessuti convenzionali.

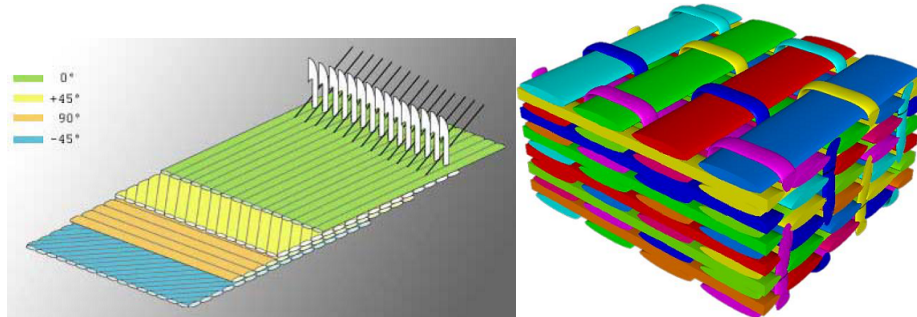


Figura 1.18: Tessuti multiassiali (non-ondulati)

I principali vantaggi dei multiassiali rispetto ai tessuti sono:

- Orientabilità delle fibre sui differenti assi
- Miglior resistenza alla fatica
- Miglior resistenza agli impatti
- Alta densità delle fibre
- Costo di produzione inferiore
- Maggiore drappabilità

Nel caso 3D, invece, la struttura è banalmente descritta come la regolare alternanza di un prefissato numero di roving in ognuna delle tre direzioni dello spazio; qui le direzioni delle fibre possono diventare 5 (costruzioni 5D) se vengono alternati piani a diverse quote Z recanti fibre disposte secondo le diagonali del piano stesso.

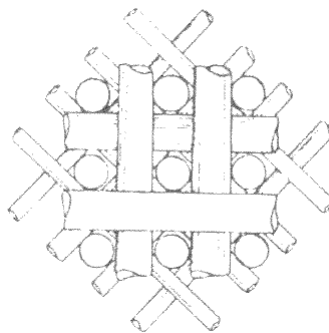


Figura 1.19: Preforma non-ondulata 3D

In questi casi, una importante variabile in possesso del progettista nella definizione delle caratteristiche meccaniche presentate dalla preforma è il numero relativo di roving disposta in ognuna delle tre dimensioni dello spazio: variando tale numero, è possibile definire le proprietà della struttura singolarmente nelle tre direzioni; a tale proposito, è opportuno citare la rilevazione empirica che fa notare come già il 10% in volume sul totale del composito finale sia un ammontare di fibre sufficiente - da disporre nella terza dimensione di un laminato - per soddisfare le esigenze di molte applicazioni, anche di tipo altamente avanzato e di elevate caratteristiche e prestazioni come quelle del settore aerospaziale. Le preforme 3D non ondulate si presentano spesso in una forma cilindrica (calza), nelle quali le direzioni X e Y divengono rispettivamente la direzione radiale e circonferenziale, con direzione Z immutata.

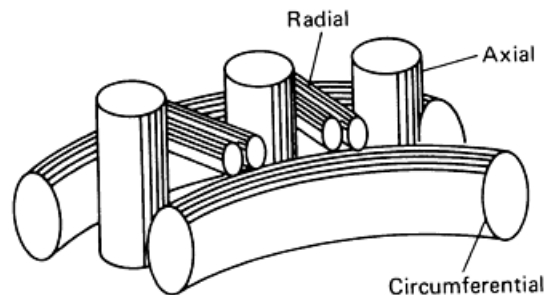


Figura 1.20: Geometria di preforma wave 3D polare

Quando si necessita di forme non assialsimmetriche, quali bordi d'attacco, transizioni da cono a rettangolo, è utilizzato un processo a due stadi. Il primo stadio consiste nella tessitura di un tessuto dalla geometria appropriata. Poi, la preforma è piazzata in uno stampo metallico, deformato alla forma desiderata ed impregnato secondo le tecniche RTM che va a garantirne la stabilità geometrica.

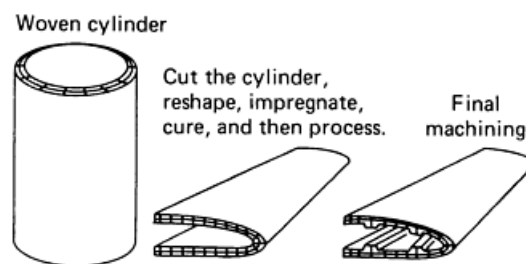


Figura 1.21: Deformazione di preforma cilindrica 3D a formare un bordo d'attacco

Se con i tessuti non ondulati lo sforzo verso il miglioramento delle proprietà meccaniche allontana dalla considerazione dei fattori tecnologici, nella direzione opposta vanno i tessuti *magliati*.

I tessuti magliati possono essere suddivisi in due categorie, weft e warp, che differiscono nel fatto che il primo tipo viene magliato in direzione orizzontale, mentre il secondo nella direzione verticale.

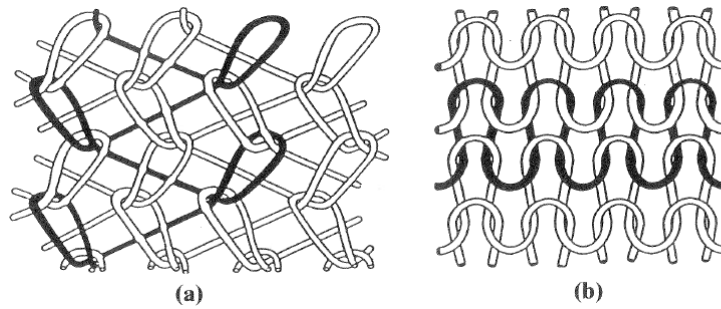


Figura 1.22: Tessuto magliato di tipo warp e weft

Essi sono concepiti con lo scopo di fornire una migliore conformabilità della preforma a geometrie complesse dello stampo che realizzerà il prodotto finito. La struttura della maglia presenta caratteristiche di integrazione superiori rispetto alla struttura intessuta, che consentono, anche in presenza di sensibili deformazioni della geometria originaria, di non generare zone di perdita della integrità delle interconnessioni del reticolo. La compattezza della costruzione realizzata dalla maglia è molto inferiore a quella che caratterizza le due strutture descritte in precedenza (*intessuta* e *non ondulata*), risultando in un reticolo di tipo molto più aperto: ciò si traduce ovviamente in una minore percentuale totale di rinforzo ottenibile nel composito, ma certamente vengono aumentate le possibilità di ottenere una totale e più uniformemente distribuita impregnazione delle fibre in sede di operazione con tecnologie per trasferimento di resina (RTM).

Allo scopo di aumentare la stabilità della maglia, spesso si adotta la soluzione dell'inserimento nella struttura di vari ordini di roving lineari: essi possono essere posti in quantità e direzioni variabili in funzione delle esigenze dettate dalla specifica applicazione da realizzare: è tipica la costruzione caratterizzata dall'inserimento dei roving addizionali sia nelle due principali direzioni di trama e ordito, sia nelle due direzioni diagonali. E' esattamente questa la procedura adottata per realizzare preforme 3D appartenenti a questa classe di strutture tessute. Appare chiara la possibilità, con il metodo appena citato, di calibrare le proprietà della preforma nella misura desiderata in funzione delle varie direzioni, nonché la disponibilità di uno strumento per conferire la stabilità della struttura ritenuta più opportuna per ogni particolare direzione dello spazio. Sottolineando la possibilità offerta di regolare la grammatura relativa dei roving in ogni ordine e direzione nella maglia, è il caso di notare che il limite posto all'aumento della quantità di roving lineari, contemporaneamente alla riduzione dello spessore dei roving costituenti la maglia vera e propria, è posto dal raggiungimento della struttura non ondulata più classica, già esposta in precedenza; si ricorda che essa viene realizzata quando un unico filo di tessitura a maglia viene utilizzato per connettere più ordini planari di roving lineari strettamente impacchettati.

Con il tessuto *intrecciato* (braided) si ritorna verso una struttura di grande compattezza, in cui i roving sono strettamente interconnessi, lasciando ben poco spazio ai vuoti del reticolo. Le preforme intrecciate esistono in vari formati, da quello puramente planare a quello tubolare - sia cavo sia pieno - e naturalmente anche in forma tridimensionale. Il tessuto può essere strutturato sia per offrire una grande conformabilità allo stampo, sia per conferire al composito grande resistenza in determinate

direzioni dello spazio: quest'ultima caratteristica viene concretizzata dall'inserzione nel reticolo di roving lineari nelle direzioni volute (di solito parallelamente all'asse longitudinale principale del tessuto, ottenendo così elevate prestazioni in trazione lungo tale asse). Un difetto dei materiali realizzati con queste preforme è la scarsa resistenza a sollecitazioni di compressione, anche se dirette lungo l'asse del rinforzo lineare inserito.

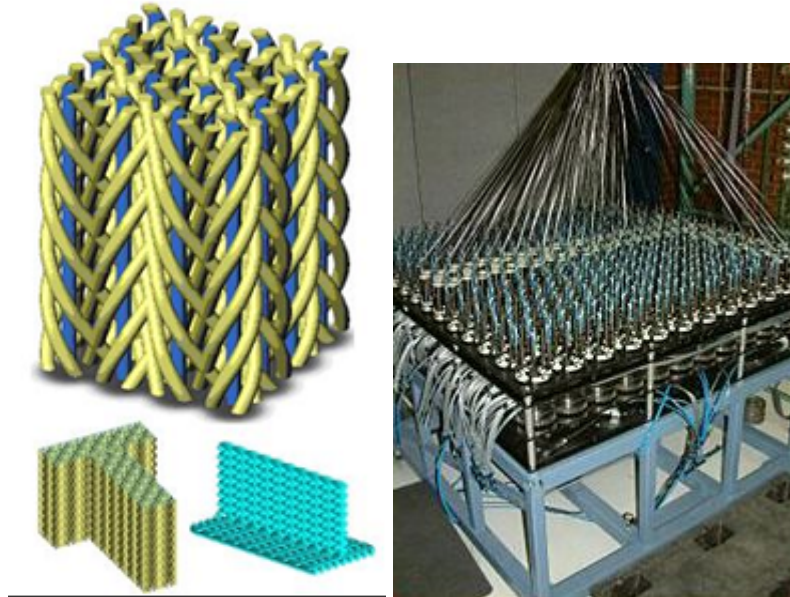


Figura 1.23: Preforma 3D braided (fonte 3tex.com)

Esiste testimonianza in letteratura della possibilità di variazione da introdurre nel processo di tessitura della treccia, allo scopo di ottenere preforme *near - net - shape* per particolari manufatti. Sono state realizzate forme di varia natura: profili scatolati, sezioni a U, a T, a doppio T, nonché manufatti assialsimmetrici con profili variamente complessi. E' inoltre possibile deformare preforme braided cilindriche (calze) a formare geometrie di diverso tipo poi cucite (stitching composites Fig. 1.24)

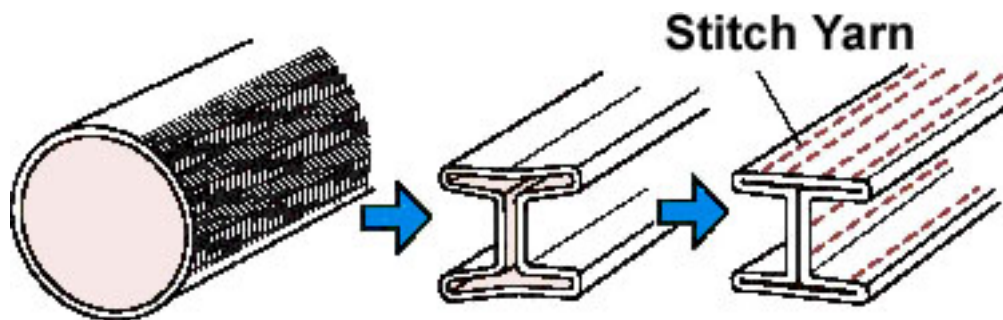


Figura 1.24: Il tubo braided è deformato in una forma ad H e cuciture vengono eseguite lungo le linee tratteggiate

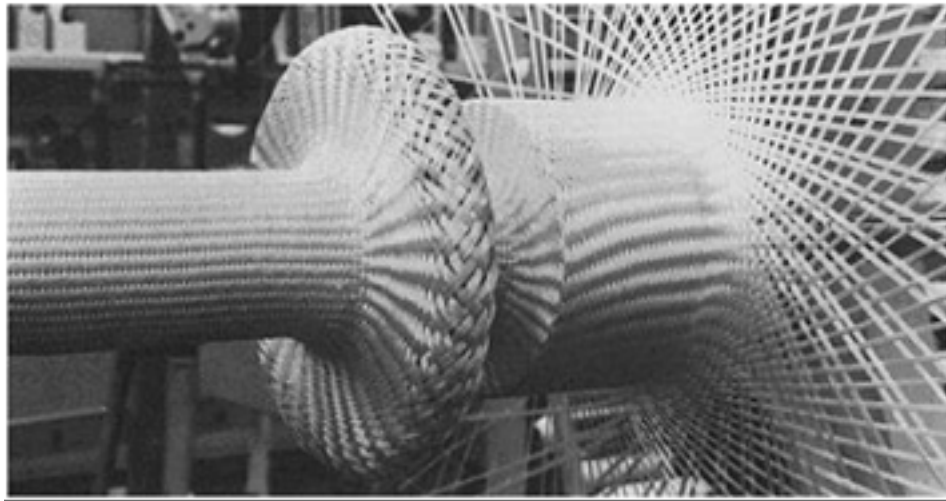


Figura 1.25: Preforma realizzata in overbraiding

Con l'utilizzo di preforme tridimensionali sono state realizzate applicazioni in materiale composito con tutte le classi di matrici: esistono prodotti con rinforzi 3D con matrice metallica, ceramica, di carbonio, e ovviamente, polimerica. Dal punto di vista delle proprietà mostrate dai compositi polimerici con rinforzi 3D, le maggiori differenze in positivo rispetto ai laminati puri si registrano per la resistenza alla delaminazione - la quale è praticamente assente in questi materiali - e per la capacità di assorbimento di energia da sollecitazioni di impatto.

1.1.8 Forme specifiche per fibre di carbonio

Il prodotto industriale fornito dal fabbricante è costituito da fasci di fibre detti tows, ciascuna delle quali è composta da un numero variabile di singoli filamenti, aventi caratteristiche omogenee di resistenza meccanica e di densità. Si hanno generalmente fibre (yarn) costituite da 1000, 3000, 6000, 12000, od anche 24000 filamenti di base, e strand con un numero variabile di yarn: 24, 48, 96, ecc. Uno yarn formato da 3000 filamenti è denominato yarn 3K.

Uno yarn è un fibra ritorta, mentre un roving è formato da un numero di estremità e filamenti raccolti parallelamente in un contenitore con nessun o con scarso attorcigliamento ed è definito dal numero di estremità. Questi fasci possono poi essere intessuti con orditure e trame diverse dando luogo a nastri, trecce, tessuti ecc. di dimensioni geometriche, pesi e stili estremamente diversificati, che vengono designati e classificati dai vari fabbricanti in base al tipo di tessuto, allo spessore, al peso ed alla lunghezza di fornitura del prodotto.

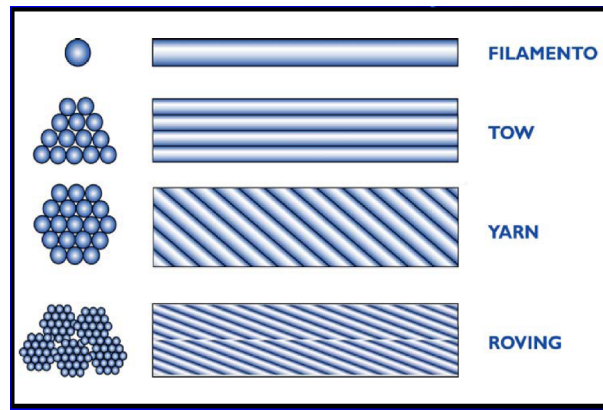


Figura 1.26: Forme di fibre

La nuova industria del carbonio e delle fibre di aramide sono per lo più orientate alla progettazione su misura, ma mentre il mercato dell' aerospace matura, alcuni formati di fibra stanno diventando standard. La Tab. 1.27 fornisce una lista riassuntiva degli stili di tessuto tipicamente in uso, affiancati dalle proprietà tipiche del composito in matrice epossidica corrispondentemente realizzato.

Weave	Yarns/in., warp \times fill	Weight		Thickness at 25 kPa (3.4 psi)	
		kg/m ²	oz/yd ²	mm	in.
Typical fabric weaves					
Eight-harness satin	24 \times 23	0.370	10.9	0.46	0.018
Eight-harness satin	24 \times 23	0.370	10.9	0.48	0.019
Plain	12½ \times 12½	0.190	5.6	0.30	0.012
Five-harness satin	24 \times 24	0.125	3.7	0.20	0.008
CFS	24 \times 12	0.20	6.0	0.23	0.009
Plain	11½ \times 11½	0.19	5.7	0.25	0.010
Five-harness satin	11 \times 11	0.370	10.9	0.50	0.020
Plain	8 \times 8	0.525	15.5	0.81	0.032
Eight-harness satin	10½ \times 10½	0.755	22.2	1.0	0.040
Plain	10 \times 10	0.345	10.2	0.48	0.019
8HS	21 \times 21	0.393	11.6	0.38	0.015

Tabella 1.9: Tipici stili di tessuto [1]

1.1.9 Forme specifiche per fibre di vetro

Le fibre di vetro vengono impiegate a partire da forme commerciali di vario tipo, le più comuni delle quali sono i roving a strands paralleli non ritorti avvolti in gomitolo su bobine con o senza cilindro di avvolgimento. Tagliando il roving in frammenti di qualche centimetro di lunghezza e disponendo questi pezzi con orientazione casuale nel piano, si ottiene un mat o feltro. La consistenza di un mat, importante in quanto permette che esso sia facilmente maneggiato, è ottenuta imbevendo le fibre in appositi leganti. I mat sono commercialmente forniti sotto forma di rotoli di larghezza variabile e sono caratterizzati dal loro peso per unità di superficie. Vi sono poi gli yarn che sono costituiti da uno o più strand ritorti a "S" od a "Z", o misti bilanciati. Questi filati di base servono a realizzare i vari tipi

di tessuto detti anche stili, intrecciati come già visto precedentemente, detti woven roving, oppure per fabbricare feltri o stuoie (mat), che possono essere sia costituiti da pezzi di strand disposti casualmente (chopped strand mat), oppure da strand continui disposti sempre casualmente (continuous strand mat). Maggiori osservazioni su di esse sono riportate nei seguenti paragrafi e sono illustrate nelle fotografie della Fig. 1.27.

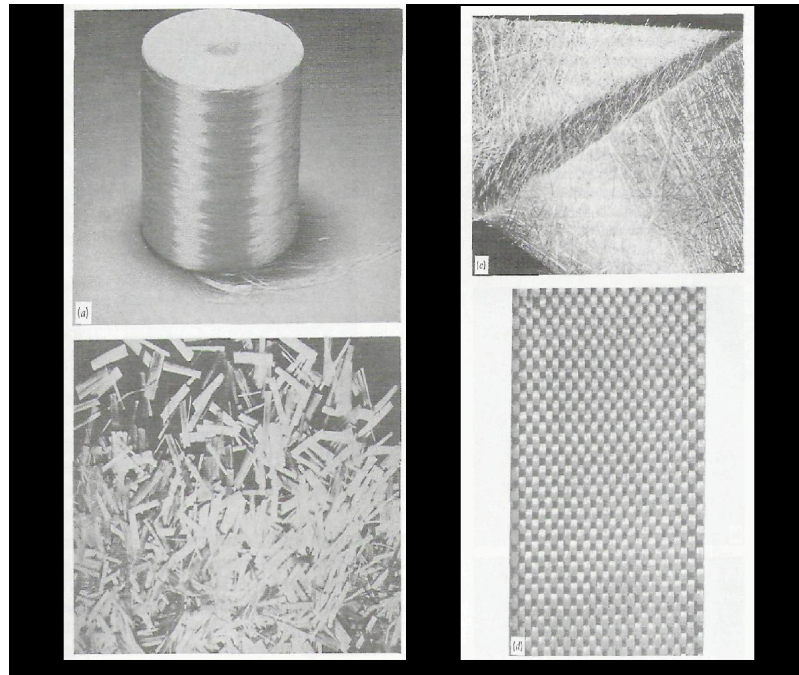


Figura 1.27: Forme di fibre di vetro

L'industria della fibra di vetro ha stabilito chiare categorie di stili di tessuti:

Fabric weight	Areal wt, kg/m ² (oz/yd ²)	Thickness, μm (mil)
Light	0.10–0.35 (3–10)	25–125 (1–5)
Intermediate	0.35–0.70 (10–20)	125–250 (5–10)
Heavy	0.50–1.0 (15–30)	250–500 (10–20)

Tabella 1.10: Stili di tessuti di fibre di vetro

Fibre di vetro in rotoli (roving). I rotoli di fibre di vetro sono un ammasso di filamenti paralleli continui. Rotoli convenzionali vengono prodotti avvolgendo assieme il numero necessario di singoli filamenti per ottenere la resa desiderata (numero di metri di rotolo per kg di peso). Generalmente, i rotoli sono costituiti con fibre del diametro di 9 o 13 μm con specifiche che vanno da 3600 a 450 m/kg e tipicamente sono formati da 20 filamenti. I filamenti in rotoli vengono usati direttamente nella (pultrusion), nell'avvolgimento dei filamenti e nelle lavorazioni industriali.

Fibre di vetro in rotoli per uso tessile (woven roving). I rotoli di fibre di vetro possono essere tessuti per produrre un tessuto rozzo e pesante per applicazioni che richiedono una rapida spessa copertura di aree estese. Questa caratteristica risulta utile specialmente nella fabbricazione delle

barche in fibra di vetro, di vari articoli per la navigazione e molti tipi di utensili. Le fibre di vetro tessile sono disponibili in diverse larghezze e peso.

Fogli di filamenti di fibre di vetro (chopped – strand mat). Esistono tre forme fondamentali di fogli di fibre di vetro: fogli a filamenti frammentati, fogli a filamenti continui, fogli levigati o membrane.

I fogli a filamenti frammentati costituiscono un materiale non tessuto in cui i filamenti di fibra di vetro dal rotolo vengono tagliati in frammenti di 25–50 mm di lunghezza, vengono distribuiti uniformemente in modo casuale sopra un piano orizzontale, e legati assieme per mezzo di un appropriato legante chimico. Questi fogli sono disponibili nella larghezza da 5 cm a 2 m e con un peso da 0.25 a 0.92 kg/m².

I fogli a filamenti continui consistono di fibre di vetro non frammentate depositate e allacciate le une alle altre a spirale. Questo foglio è maneggevole ed elastico e, come risultato dell'allacciamento meccanico delle fibre, non richiede molto legante per un'adeguata resistenza alla manipolazione.

I fogli levigati sono fogli molto sottili di singoli filamenti continui spesso usati come superfici di rinforzo nelle fasi di copertura manuale o di modellamento per rifinire rapidamente il materiale principale agendo sulla sua superficie e rendendola più liscia.

Filati (yarn) tessili di fibra di vetro. Uno yarn è una combinazione di filamenti che possono essere tessuti agevolmente per creare materiali tessili. Il singolo filamento continuo così come viene fuori dal connettore di platino rappresenta la forma più semplice di filamento tessile in fibra di vetro ed è definito come single yarn. Allo scopo di usare appropriatamente ed efficientemente questo filamento nelle operazioni di tessitura, vi è una operazione aggiuntiva per garantire la integrità del filamento torcendolo debolmente di solito con meno di 40 giri per metro.

Comunque molti materiali tessuti (woven) richiedono filati più pesanti di quelli che possono essere convenientemente tirati dal connettore. Questi possono essere prodotti combinando le operazioni di attorcigliatura ad esempio attorcigliando due o tre filamenti assieme e successivamente attorcigliando due o più di questi filamenti tra loro.

Tessuto di fibre di vetro. Filati di fibra di vetro vengono tessuti secondo procedure di tessitura standardizzate. Le proprietà e il contributo alle performance del tessuto in fibra di vetro dipendono dalla fabbricazione del tessuto e dalle sue caratteristiche: numero di filamenti per pollice in ogni direzione, modello di tessitura, e tipo di filamento.

Fibre di vetro a filamento frammentato e frantumato. Filamenti continui di fibra di vetro possono essere frammentati a lunghezze prefissate o frantumati per percussione in fibre di lunghezza molto piccola (generalmente 0.4–0.5 mm). Le lunghezze reali vengono determinate dal diametro delle aperture di selezione attraverso le quali le fibre passano durante la frantumazione. Le fibre frantumate sono usate come rinforzo e riempitivo nelle resine termoplastiche e termoindurenti.

1.1.10 Forme specifiche per fibre di aramide

In linea di principio le fibre di aramide possono essere ottenute nelle stesse forme viste per le fibre di vetro ma, avendo rispetto alle altre fibre un modulo elastico più elevato e resistenza non particolar-

mente vantaggiosa, si preferisce in genere utilizzare formati a fibre altamente orientate per sfruttare, nel migliore dei modi, il vantaggio offerto dalla maggiore rigidità del rinforzo.

Le fibre aramidiche sono disponibili sotto forma di fibre continue (yarn e roving), fibre discontinue (staples) e tessuti. Esistono tre tipi di yarn che differiscono tra loro per numero di tex (1 tex = 1 g/km), proprietà a trazione e impiego. Il tipo a minor modulo ha numero di tex 1500 ÷ 3000 e serve a rinforzare pneumatici, tubi flessibili ed elementi meccanici di gomma. Quelle con modulo superiore hanno tex 195 ÷ 1500, e sono utilizzate per applicazioni a elevate prestazioni che richiedono leggerezza, modulo e resistenza notevoli, smorzamento di vibrazioni, resistenza a danno a fatica. Yarn con basso numero di tex (195 ÷ 380), sono impiegati per la fabbricazione di tessuti sottili e leggeri; yarn con numero di tex 1140 ÷ 1420, sono impiegati per tessuti più spessi; yarn con numero di tex 1460, sono destinati in genere alle tecnologie per avvolgimento di fibre continue, mentre quelli con numero di tex da 6000 a 22720 per applicazioni di pultrusione. Le staples possono servire per la produzione di molding compounds, mentre non sono disponibili commercialmente mat di fibre tagliate o roving per tecnologie di taglio e spruzzo in quanto l'elevata tenacità rende difficile il taglio con le attrezzature convenzionalmente usate per le fibre di vetro.

Molti di questi tessuti in fibra aramidica di Kevlar sono state progettate e costruite per essere equivalenti in volume allo stesso numero di stile dei tessuti di fibra di vetro.

Style No.	Weave	Basis weight		Fabric construction		Yarn denier	Fabric thickness	
		g/m ²	oz/yd ²	ends/cm	ends/in.		mm	10 ⁻³ in.
Light weight								
166 ^(a)	Plain	30.6	0.9	37 × 37	94 × 94	55	0.04	1.5
199 ^(a)	Plain	61.13	1.8	24 × 24	60 × 60	55	0.05	2
120	Plain	61.1	1.8	13 × 13	34 × 34	195	0.11	4.5
220	Plain	74.7	2.2	9 × 9	22 × 22	380	0.11	4.5
Medium weight								
181	Eight-hardness satin	169.8	5.0	20 × 20	50 × 50	380	0.23	9
281	Plain	169.8	5.0	7 × 7	17 × 17	1140	0.25	10
285	Crowfoot	169.8	5.0	7 × 7	17 × 17	1140	0.25	10
328	Plain	230.9	6.8	7 × 7	17 × 17	1420	0.33	13
355	Crowfoot	239.9	6.8	7 × 7	17 × 17	1420	0.30	12
500	Plain	169.8	5.0	5 × 5	13 × 13	1420	0.28	11
Unidirectional								
143	Crowfoot	190.2	5.6	39 × 8	100 × 20	380 × 195	0.25	10
243	Crowfoot	227.5	6.7	15 × 7	38 × 18	1140 × 380	0.33	13
Woven roving								
1050	4 × 4 basket	356.6	10.5	11 × 11	28 × 28	1420	0.46	18
1033	8 × 8 basket	509.4	15.0	16 × 16	40 × 40	1420	0.66	26
1350	4 × 4 basket	458.5	13.5	10 × 9	26 × 22	2130	0.64	25

Tabella 1.11: Specifiche di woven roving e fabric di Kevlar 49[1]

1.1.11 Tessuti ibridi

I compositi ibridi combinano nella stessa matrice più di un tipo di fibre di rinforzo. Le fibre possono differire per natura o per formato. Essi ampliano la gamma di proprietà ottenibili dai compositi; la loro peculiarità è che a un costo anche inferiore ai compositi semplici esibiscono una distribuzione delle loro proprietà più uniforme nei valori. Per esempio di possono utilizzare contemporaneamente fibre di carbonio e fibre di aramide per le loro proprietà complementari; infatti, le prime hanno resistenza e

modulo notevoli ma scarsa resistenza a carichi dinamici, mentre le seconde possiedono un modulo e resistenza a trazione inferiore alle fibre di carbonio ma maggiore resistenza all'impatto e coefficiente di dilatazione termica compatibile con le prime (ambedue negativi). Quest'ultima circostanza riduce, tra l'altro, le tensioni interne al materiale. Nel caso dell'accoppiamento di fibre di carbonio e fibre di aramide con fibre di vetro, l'effetto è di aumentare il modulo elastico del composito rispetto al solo rinforzo di vetro. I tessuti ibridi in commercio hanno due tipi di configurazione: nel primo caso diversi tipi di fibre sono presenti sia nella trama che nell'ordito; nel secondo la trama è costituita da un tipo di fibre, mentre l'ordito ne contiene un tipo differente.

La Tab. 1.12 mostra tipiche proprietà di tessuti ibridi grafite/aramide. La possibilità di poter combinare diverse fibre permette ai progettisti una grande flessibilità progettuale. Tra i motivi dell'ibridizzazione dei compositi in grafite vi sono (1) aggiungere un altro tipo di fibra in un composito a predominanza di fibra di carbonio in modo da superare gli svantaggi intrinseci del carbonio, (2) aggiungere fibre di grafite in un composito a predominanza di fibra no-carbonio o in altre strutture in modo da assicurarsi i vantaggi delle buone proprietà del carbonio, e (3) produrre strutture a costo minore.

Normalmente, la resistenza ad impatto dei compositi a fibra di carbonio può essere aumentata aggiungendo fibre ad alta tenacità e maggiore allungamento a rottura rispetto al carbonio (fibre più tenaci). Meccanismi che devono severamente assorbire energia sono stati proposti includendo strati di resina interlacciati per assorbire energia e utilizzando riempitivi per fermare il propagarsi delle cricche. La Tab. 1.13 mostra le proprietà all'impatto di tipici tessuti ibridi grafite/aramide e grafite/vetro.

Ratio of aramid graphite fiber	Tensile modulus, 0°/90°		Tensile modulus, fabric		Fabric efficiency, %	Tensile strength, 0°/90°		Tensile strength, fabric		Fabric efficiency, %	Compressive strength, 0°/90°		Compressive strength, fabric		Fabric efficiency, %
	GPa		GPa			MPa		MPa			MPa		MPa		
	10 ⁶ psi	10 ⁶ psi	10 ⁶ psi	10 ⁶ psi		ksi	ksi	ksi	ksi		ksi	ksi	ksi	ksi	
100/0	36.5	5.29	35.8	5.19	98	579	84.0	544	78.9	94	165	23.9	152	22.0	92
50/50	55.1	7.99	48.2	6.99	87	572	83.0	400	58.0	70	407	59.0	227	32.9	56
25/75	69.6	10.1	57.2	8.30	82	661	95.9	434	62.9	66	641	93.0	317	45.0	49
0/100	72.3	10.5	59.9	8.69	83	730	105	434	62.9	59	965	140	558	80.9	58

Tabella 1.12: Proprietà di tessuti compositi ibridi carbonio/aramide per laminati 0°/90° di unidirezionali (dati normalizzati al 65% in volume di fibra)

Hybrid composite ^(a) , wt%	Izod impact strength, unnotched	
	J/m	ft · lbf/in.
Graphite, 100%	1495	28
Graphite, 75%; aramid, 25%	1815	34
Graphite, 50%; aramid, 50%	2349	44
Aramid, 100%	2562	48
Graphite, 100%	1495	28
Graphite, 75%; glass, 25%	2349	44
Graphite, 50%; glass, 50%	2989	56
Glass, 100%	3843	72

Tabella 1.13: Resistenza all'impatto di compositi ibridi

Esistono in commercio anche tessuti ibridi con metalli.

A causa dei diversi coefficienti di dilatazione termica le applicazioni di questi materiali sono limitate a funzioni prevalentemente estetiche o comunque a temperature ambiente.

1.2 Matrici

1.2.1 Introduzione

Genericamente una resina può essere definita come prodotto organico, solido o semisolido, d'origine naturale o sintetica, senza un preciso punto di fusione e, generalmente, d'alto peso molecolare. Molte resine sono polimeri.

Le resine trovano molte applicazioni in numerosi settori industriali, in particolare l'attenzione è qui rivolta alle applicazioni dell'industria tessile e dei materiali compositi.

La principale distinzione che viene fatta è quella tra le resine termoplastiche e quelle termoidurenti.

Le resine termoplastiche sono polimeri lineari o ramificati che possono essere fusi fornendo loro una appropriata quantità di calore; durante la fase di plastificazione non subiscono alcuna variazione a livello chimico. Possono essere forgiati (e ri-forgiati) in qualsiasi forma usando delle tecniche quali lo stampaggio ad iniezione e l'estrusione. Tramite il calore si ottiene la fusione di questi polimeri che, successivamente, a contatto con le pareti dello stampo, solidificano per raffreddamento.

Il processo di fusione/solidificazione del materiale può essere ripetuto senza apportare variazioni notevoli alle prestazioni della resina.

Generalmente i polimeri termoplastici non cristallizzano facilmente, a seguito di un raffreddamento, poiché le catene polimeriche sono molto aggrovigliate. Anche quelli che cristallizzano non formano mai dei materiali perfettamente cristallini, bensì semicristallini caratterizzati da zone cristalline e zone amorfe. Le regioni cristalline di questi materiali sono caratterizzate dalla loro temperatura di fusione (T_m , dall'inglese "melting temperature").

Le resine amorfe, e le regioni amorfe delle resine parzialmente cristalline, sono caratterizzate dalla loro temperatura di transizione vetrosa (T_g , dall'inglese "glass transition temperature"), temperatura alla quale si trasformano abbastanza bruscamente dallo stato vetroso (molto rigido) a quello gommoso (molto più morbido). Questa transizione coincide con l'attivazione di alcuni moti delle macromolecole che compongono il materiale. Al di sotto della T_g le catene polimeriche hanno difficoltà a muoversi e hanno posizioni molto bloccate.

Sia la temperatura di fusione sia quella di transizione vetrosa aumentano all'aumentare della rigidità delle catene che compongono il materiale e all'aumentare delle forze di interazione intermolecolari.

Le resine termoidurenti sono materiali molto rigidi costituiti da polimeri reticolati nei quali il moto delle catene polimeriche è fortemente limitato dall'elevato numero di reticolazioni esistenti. Durante la fase di trasformazione subiscono una modificazione chimica irreversibile.

Le resine di questo tipo, sotto l'azione del calore nella fase iniziale, fondono (diventano plas-

tiche) e, successivamente, sempre per effetto del calore, solidificano. Le resine termoindurenti sono intrattabili una volta che siano state formate e degradano invece di fondere a seguito dell'applicazione di calore. Contrariamente alle resine termoplastiche, quindi, non presentano la possibilità di subire numerosi processi di formatura durante il loro utilizzo.

La matrice in un composito ha essenzialmente il compito di tenere assieme le fibre, di trasmettere uniformemente il carico alle fibre e di proteggerle da azioni meccaniche di taglio e da agenti atmosferici e corrosivi, una buona matrice deve avere una buona resistenza meccanica. Una buona resistenza allo scorrimento fibra-matrice ed una buona resistenza agli agenti atmosferici (umidità, ultravioletti) ed alla corrosione. Vari materiali rispondono in modo soddisfacente a tali requisiti e diversi materiali sono attualmente utilizzati come matrice di compositi strutturali. In base al materiale costituente la matrice i compositi si distinguono in:

1. compositi a matrice polimerica (PMC, *polymer-matrix composites*);
2. compositi a matrice metallica (MMC, *metal matrix composites*);
3. compositi a matrice ceramica (CMC, *ceramic-matrix composites*).

I PMCs, sviluppati a partire dalla seconda guerra mondiale dall'industria aeronautica e facenti uso di fibre di vetro, carbonio ed aramide (*multifilaments*), negli ultimi decenni hanno subito una notevole diffusione come materiali strutturali nel settore dei trasporti, civile, degli articoli sportivi, ecc. A questa diffusione molto ha contribuito la crescita della massima temperatura di esercizio della matrice che ora può arrivare sin a circa 280° C (poliammide).

I MMC sono stati sviluppati a partire dagli anni '50 per migliorare la resistenza dei materiali metallici tradizionali (soprattutto alluminio) utilizzando fibre di boro e di carburo di silicio (*monofilaments*). Successivamente sono state pure ottenuti MMC con matrice di magnesio, rame, acciaio e titanio rinforzati con fibre discontinue o particelle in materiale ceramico. Si tratta generalmente di materiali isotropi con caratteristiche meccaniche confrontabili con quelle dei migliori PMCs (carbonio-resina epossidica). I costi relativamente elevati ne limitano però l'uso a particolari componenti aeronautici e motoristici (esempio valvole in titanio rinforzato ecc). I CMC infine, sono stati sviluppati appositamente per ottenere materiali di buone proprietà fisico meccaniche capaci di resistere alle elevate temperature.

Tra tutti, i materiali compositi di gran lunga più utilizzati per usi "strutturali" sono i PMCs. Solitamente la matrice di questi materiali è costituita da resine termoindurenti o termoplastiche. I materiali termoindurenti sono comunque di gran lunga più utilizzati in quanto realizzano facilmente catene spaziali complesse relativamente resistenti e soprattutto sono caratterizzati da bassa viscosità che permette di bagnare facilmente le fibre. Ciò consente di ottenere una buona adesione fibra-matrice ed al tempo stesso di raggiungere rapporti volumetrici fibra-matrice maggiori del 70-80%. Con i termoplastici, invece, nonostante i notevoli miglioramenti compiuti negli ultimissimi anni, tale rapporto difficilmente può superare il 60%, ed a causa della viscosità relativamente elevata i costi di produzione sono ancora piuttosto elevati.

Nella tabella 1.14 si riportano alcuni vantaggi e svantaggi dell'uso di matrici termoindurenti e di matrici termoplastiche.

Applicazioni	Proprietà	Matrice termoindurente	Matrice termoplastica
Matrice	Composizione	Complessa	Più semplice
	Melt viscosity	Bassa (all'inizio)	Abbastanza alta
	Impregnazione della fibra	Buona	Molto difficile
	Costo	Basso, Medio	Basso, Alto
Prepreg	Fissaggio/Drappabilità	Buona	Abbastanza Bassa
	Conservazione	Veramente Bassa	Buona
Composito	Ciclo di lavorazione	Molto lungo	Corto, Lungo
	Pressione e Temperatura di lavorazione	Moderate	Alte
	Dimensione dei prodotti	Possono essere molto larghi	Piccoli, Medi
	Resistenza ai solventi	Buona	Scarsa, Buona
	Resistenza al danno	Scarsa, Eccellente	Ragionevole, Buona
	resistenza al creep	Buona	Non conosciuta
	Delaminazione		
	Tenacità	Bassa	Alta
	Facile da fabbricare	Lavorazione intensa	Lavorazione meno intensa

Tabella 1.14: Vantaggi e svantaggi delle matrici termoindurenti e termoplastiche

Una importante classificazione dei diversi tipi di matrici è anche in relazione al valore delle temperature massime di impiego alle quali possono essere adoperate senza dover subire fenomeni di degradazione. Le temperature limite d'impiego di alcuni tipi di matrici oggi usate sono riportate nella sottostante Tabella 1.15.

Tipo di matrice	Temperatura limite
Matrici organiche	377°C
Matrici metalliche in alluminio	462°C
Matrici metalliche in titanio, leghe di titanio, alluminio di titanio, titanio-alluminio	962°C
Matrici metalliche in nickel-alluminio	1177°C
Matrici ceramiche	1462°C
Matrici in carburo di silicio e nitrato di silicio	1627°C
Matrici ceramiche e carbon-carbon	1627°C

Tabella 1.15: Temperature limite d'impiego di alcuni tipi di matrici

Le matrici polimeriche come i materiali grezzi costituiscono di solito il 40% del costo totale del composito, seguito dal 30% del costo di fabbricazione.

1.2.2 Matrici polimeriche

I materiali polimerici hanno oggi assunto una rilevanza eccezionale in campo tecnologico, ed in particolare nella realizzazione dei compositi, dove vengono utilizzati per costituire sia le fibre che le matrici.

I polimeri sono composti chimici dotati di struttura molecolare di elevato peso, di grandi dimensioni ad andamento geometrico curvilineo o anche rettilineo.

Si dividono in inorganici ed organici. I primi sono del tipo dei vetri o dei ceramici. Quelli organici invece vengono costituiti partendo da composti chimici del carbonio, detti monomeri, ed aventi molecole di piccole dimensioni che ripetendosi con continuità nello spazio per centinaia o migliaia di volte, danno luogo alla struttura macromolecolare a catena che caratterizza il polimero considerato.

Le materie plastiche a struttura polimerica organica possono essere classificate in due categorie distinte: materiali termoindurenti e materiali termoplastici.

Le sostanze termoindurenti, quando vengono riscaldate a temperatura opportuna induriscono, perché formano catene polimeriche unite tra loro con legami chimici trasversali stabili, dati da forze intermolecolari consistenti che bloccano le catene stesse in reticoli tridimensionali più o meno regolari e resistenti.

Una volta che tali sostanze sono state indurite non modificheranno più la loro forma né si potranno rifondere di nuovo o rimodellare.

Le sostanze termoplastiche invece, quando sono riscaldate rammolliscono e fondono perché le catene polimeriche restano sempre ben distinte non intervenendo reazioni con formazione di legami chimici, pur potendo interagire meccanicamente tra loro.

Se i monomeri costituenti il polimero considerato sono diversi tra loro si ha la formazione di copolimeri. I monomeri presenti in essi possono poi essere disposti casualmente o a blocchi, formanti ciascuno un polimero diverso dotato di peculiarità proprie.

Conseguentemente nel suo insieme il copolimero presenterà caratteristiche complessive intermedie tra quelle dei polimeri che lo costituiscono. Questi composti si dividono ancora in tattici ed atattici.

I primi sono ordinati regolarmente con un impaccamento fitto delle molecole che costituiscono i gruppi laterali alla catena principale. I secondi hanno invece una orientazione di tali molecole che è di tipo casuale. In questo secondo caso il materiale polimerico pur essendo solido è privo generalmente di una struttura regolare, ed è quindi simile ad una sostanza amorfa, come una sostanza vetrosa, le cui molecole sono disposte tra loro come nei liquidi, pur essendo il materiale allo stato solido.

Il comportamento meccanico dei polimeri è assai variabile in considerazione della loro varietà e

del fatto che essi sono corpi viscoelastici, con una vasta gamma di caratteristiche comprese tra quelle di un liquido di elevata viscosità e quelle di un solido con struttura cristallina o vetrosa.

Applicando una sollecitazione statica, di entità relativa, ad un polimero che si comporta come un liquido viscoso, questo seguirà a deformarsi con continuità fintantoché la sollecitazione applicata resterà attiva. Questo fenomeno va sotto il nome di scorrimento viscoso o *creep*.

Se invece il polimero è simile ad un solido cristallino elastico, la sollecitazione provocherà una deformazione elastica che si manterrà inalterata solo se la sollecitazione si mantiene costante, mentre scomparirà al cessare di questa.

Il materiale polimerico potrà anche trovarsi in condizioni tali da presentare rigidità, e quindi bassa deformabilità, pur essendo dotato di una struttura amorfa simile a quella di un liquido, sarà allora assimilabile ad un vetro inorganico.

Questo comportamento dei polimeri dipende grandemente dalla natura chimica e dalla forma geometrica della catene molecolari polimeriche in esso presenti, oltre che dallo stato fisico che li caratterizza, che è influenzato dalla natura delle fasi presenti alla temperatura considerata.

Se queste sono ad alto peso molecolare, perché costituite da catene di atomi di forma allungata e regolare, ed inoltre tali catene sono impaccate regolarmente tra loro, il comportamento del polimero potrà spesso essere simile a quello di un solido cristallino elastico e plastico come un metallo, con deformabilità complessiva ridotta e resistenza anche elevata. E' il caso delle fibre di *Kevlar*.

Al contrario se il polimero è a basso peso molecolare con catene che risultano essere corte e con rami laterali irregolari, e disposte tra loro in maniera disordinata come in un liquido, il suo comportamento potrà esseri più o meno rigido, essendo lo stato interno simile a quello di un vetro inorganico. Il comportamento del materiale polimerico dipenderà però nello stesso tempo anche dalla maniera in cui verrà sollecitato dall'esterno. Se la sollecitazione è statica e cioè lentamente crescente nel tempo, il polimero avrà la possibilità di deformarsi, con un comportamento elastico o viscoelastico. Se invece le sollecitazioni sono applicate rapidamente tali deformazioni saranno ridotte o assenti ed il comportamento si avvicinerà a quello di un corpo rigido con rottura a scarso assorbimento d'energia.

Esistono anche materiali polimerici detti Gel aventi una struttura intermedia tra quelle viste di un solido e di un liquido. Essi possiedono infatti una struttura interna a scheletro che conferisce loro una certa solidità, dentro la quale sono presenti zone amorfe di tipo liquido.

Questi materiali possono presentare un comportamento elastico simile di quello dei solidi, mentre possono assumere la forma del recipiente che li contiene se abbandonati per tempi lunghi come un liquido. Se invece si presentano rigidi e poco deformabili pur mantenendo la stessa struttura interna, prendono il nome di vetri gelificati.

E' ovvio che per essere utilizzati convenientemente come materiali strutturali i materiali polimerici dovranno mostrare di avere buona elasticità, tenacità, e resistenza alle sollecitazioni meccaniche sia statiche che dinamiche con tendenza allo scorrimento viscoso molto bassa alla temperatura di esercizio.

1.2.3 Matrici termoisindurenti

Tra le matrici termoisindurenti utilizzate per la produzione di PMC's strutturali, la *resina epossidica* è il polimero di gran lunga più utilizzato; questo lascia il posto alle *resine poliestere* quando si vuole abbassare il costo del prodotto, o alle *resine poliammidiche* (in versione termoisindurente) e ai policianurati quando è richiesta una più elevata temperatura massima di esercizio. Si usano invece le *resine fenoliche* se si vuole una migliore resistenza al fuoco ed una bassa emissione di fumi tossici in caso di incendio.

Il processo di polimerizzazione delle matrici termoisindurenti avviene in genere per poliaddizione, consistente nella formazione di catene polimeriche a partire da una unità fondamentale detta *monomero* che si lega ad altri monomeri in presenza di un *induritore*. Per esempio, un monomero della resina epossidica (ne esistono varie formulazioni) è costituito 3 atomi di idrogeno, 2 di carbonio ed 1 di ossigeno.

Più in dettaglio, la polimerizzazione della resina epossidica per poliaddizione, avviene in presenza di un induritore costituito da un radicale (amine, amino derivati, anidridi) che presenta alle estremità un atomo di azoto che si lega ad uno dei due atomi di carbonio previa rottura del doppio legame con l'ossigeno.

La polimerizzazione per poliaddizione avviene con produzione di calore. E' pertanto necessario, specie in presenza di elementi di grandi dimensioni provvedere ad un appropriato smaltimento del calore al fine di evitare eccessivi riscaldamento che possono portare anche a fenomeni esplosivi. Il processo che porta alla completa polimerizzazione delle matrici termoisindurenti è costituito essenzialmente da 3 distinte fasi quali (vedi anche Fig. 1.28):

1. *gelificazione*: durante questa fase che avviene solitamente a temperatura ambiente si ottiene la polimerizzazione di circa il 70% della matrice;
2. *curing*: durante questa fase il polimero viene riscaldato sotto pressione al fine di aumentare la compattezza del materiale assicurando così un buon legame fibra-matrice e minimizzando al tempo stesso eventuali tensioni residue formatesi nella fase precedente (con conseguente ritiro) a seguito del ciclo termico associato alla polimerizzazione; in questa fase si ottiene anche l'allontanamento di eventuali inclusioni di gas ecc.
3. *post-curing*: durante questa fase il polimero viene riscaldato ad una temperatura superiore a quella precedente al fine di conseguire un ulteriore indurimento della matrice (termoisindurenti) ed un ulteriore rilascio delle tensioni residue eventualmente ancora presenti.

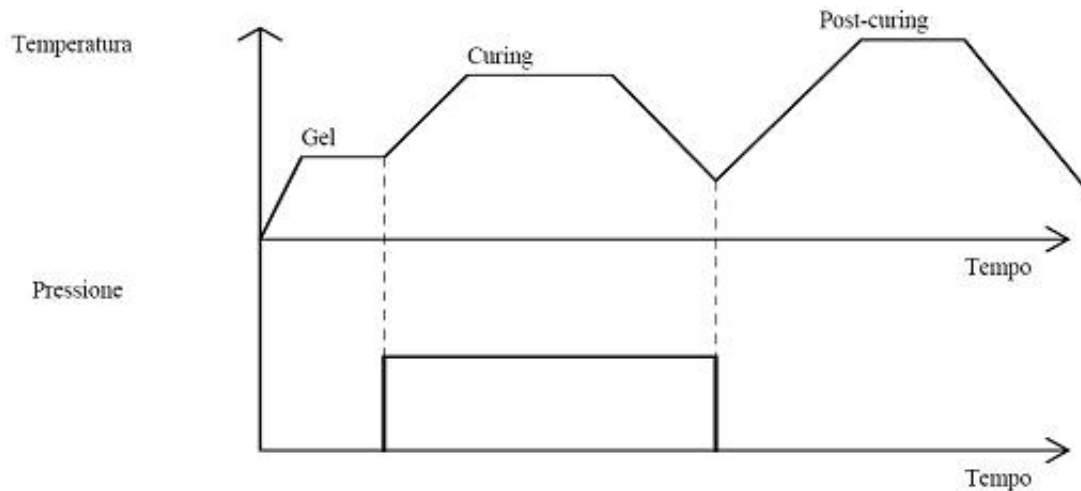


Figura 1.28: Processo di polimerizzazione

La temperatura di post-cura condiziona la temperatura critica (o temperatura di transizione vetrosa) T_g del polimero ottenuto. Per temperatura critica si intende la temperatura a cui in un polimero termoindurente avviene la rottura dei legami della catena con conseguente rammollimento del materiale. La temperatura critica è quindi la massima temperatura a cui la matrice può operare. Questa, in funzione del materiale, delle temperature di cura e post-cura, nonché della presenza di eventuali additivi, può variare da 50° C (cura a temperatura ambiente) a circa 280 °C. Le matrici polimeriche solitamente sono sensibili agli ultravioletti ed all'umidità che ne determinano una riduzione delle caratteristiche meccaniche e della resistenza allo scorrimento fibra-matrice.

A titolo di esempio, nella tabella seguente sono sinteticamente riportate alcune caratteristiche fisico-meccaniche di resine utilizzate nella produzione di compositi a matrice polimerica.

Proprietà	R.Epossidica RT cured	R.Epossidica Heat cured	R.Epossidica Advanced	R.Poliestere	R.Fenolica
Specific gravity	1.1-1.3	1.2-1.4	1.3	1.2	1.2-1.3
Tensile strength, MPa	50-70	70-90	60	50-60	50-60
Tensile modulus, GPa	2-3	2.5-3	3.5	2-3	5-11
Elongation to failure, %	2-6	2-5	2	2-3	1.2
Compression strength, MPa	80-100	120-130	300	120-140	70-200
Max operating temperature, °C	70-100	100-180	180	60-80	100-125

Tabella 1.16: Proprietà di alcune resine per compositi a matrice polimerica (PMCs).

Si vede come utilizzando resine epossidiche la temperatura massima di esercizio può variare da

50 a 180° C, sebbene all'aumento di questa corrisponde in genere una diminuzione della resistenza meccanica e soprattutto della resistenza alla frattura (infragilimento).

Resina epossidica

Attualmente viene prodotta in diverse formulazioni e tipi (liquida, semisolida ecc) e presenta in genere buona resistenza meccanica, buona compatibilità con metalli ed altri materiali di interesse ingegneristico, basso ritiro, ottimo isolamento elettrico e bassa tossicità.

Il fenomeno di solidificazione di queste resine è di una certa complessità. Da un punto di vista chimico, l'indurimento può avvenire anche a freddo con tempi lunghi. Esso porta alla eliminazione di acqua formata da ossidrilari liberi, con la formazione di legami trasversali tra le singole molecole, secondo una reazione chimica detta di reticolazione. Industrialmente il processo di indurimento viene condotto a temperatura sufficientemente elevata mediante un riscaldamento detto curing. I parametri fondamentali che hanno influenza sull'andamento dei fenomeni sono la temperatura di trattamento ed il tempo della sua durata. Per rappresentare quanto avviene si ricorre al diagramma T.T.T., ottenuto mediante trasformazioni-tempo-temperatura, rappresentato in Fig. 1.29.

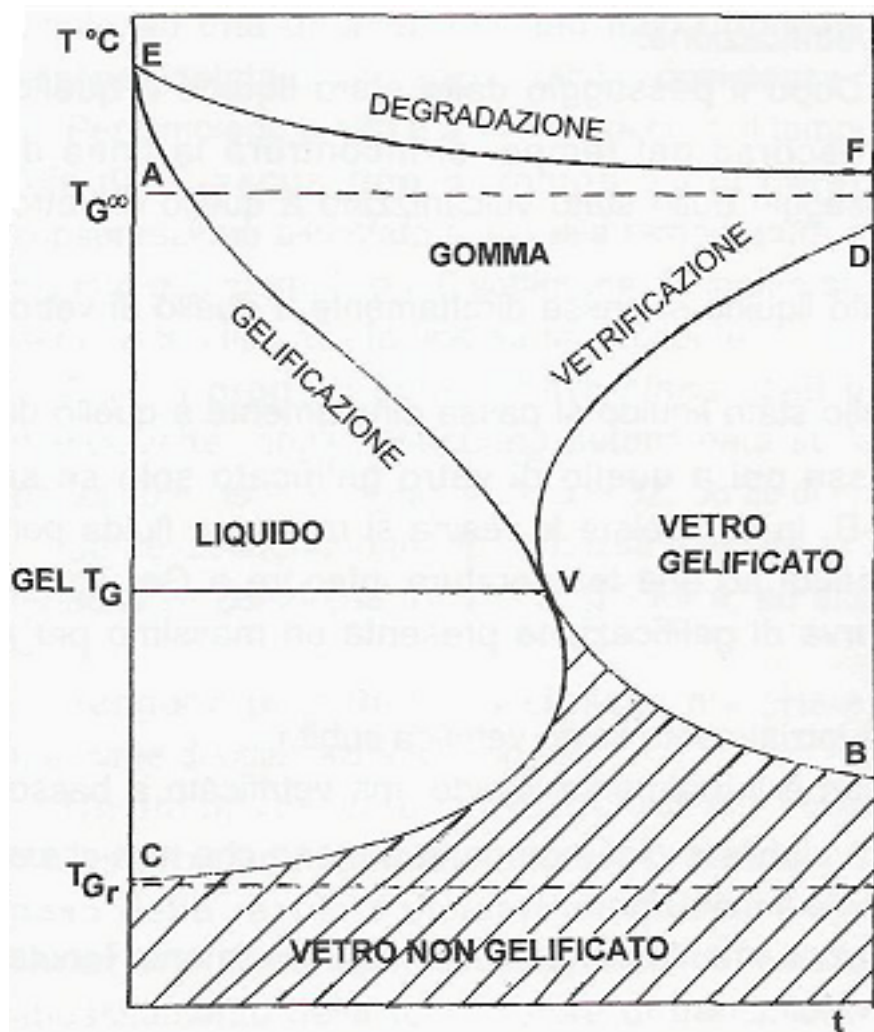


Figura 1.29: Diagramma T.T.T.

Il diagramma rappresenta i cambiamenti di stato che avvengono nel polimero a temperatura di curing costante. Esso è diviso quindi in tante zone, ciascuna delle quali rappresenta lo stato fisico chimico nel quale il sistema materiale polimerico si trova alla temperatura di trasformazione individuata in ordinate e dopo che sia trascorso il tempo individuato in ascisse. Ciascuna zona è delimitata da linee di confine che sono il luogo dei punti rappresentativi del passaggio del materiale da uno stato ad un altro. Per analizzare in dettaglio la successione dei fenomeni che si verificano nel sistema, si traccia una retta orizzontale intersecante l'asse delle ordinate in corrispondenza della temperatura di curing considerata. La successione dei fenomeni descritti dal diagramma lungo tale retta è quella che avviene a temperatura costante con una trasformazione id tipo isotermico. Esistono nel diagramma 3 temperature fondamentali influenzanti il processo. In ordine di grandezza crescente sono:

- T_{gr} : Temperatura di transizione vetrosa dallo stato fluido a quello di solido molecolare non cristallino dei reagenti, per sistemi che non attraversano lo stato gommoso;
- Gel Tg: temperatura di transizione diretta dallo stato liquido allo stato di vetro gelificato, senza passaggi intermedi allo stato gommoso;
- $T_{g\infty}$: temperatura massima di transizione vetrosa per sistemi che subiscono l'intero passaggio allo stato vetroso solo dopo aver subito quello allo stato gommoso.

Per comprendere la successione dei fenomeni, tracciamo delle rette orizzontali in ciascuno dei campi di temperatura in cui le ordinate sono suddivise dalle tre temperature caratteristiche sopra considerate.

Per $T > T_{g\infty}$: La retta orizzontale che rappresenta la trasformazione isotermica parte al tempo $t = 0$, con il sistema interamente allo stato liquido. Con il passare del tempo si incontra la linea di gelificazione A-V, che rappresenta il passaggio dallo stato liquido del polimero a quello di elastomero gommoso. Si entra quindi nel campo di stabilità della gomma. Seguitando a trascorrere il tempo, sempre a temperatura costante, si incontra la linea E-F che segna l'inizio della degradazione del polimero gommoso.

Per $T = T_{g\infty}$ si ha la trasformazione stabile di un liquido in un elastomero gommoso ed elastico senza vetrificazione.

Per $T_{g\infty} > T > T_{gr}$: Dallo stato liquido si passa direttamente a quello di vetro non gelificato. Si passa poi a quello di vetro gelificato solo se si attraversa il tratto di linea V-B. In particolare la resina si mantiene fluida per tempi prolungati se è mantenuta ad una temperatura inferiore a Gel Tg, e superiore a T_{gr} , dove la curva di gelificazione presenta un massimo per i tempi.

Per $T = T_{gr}$: se il sistema è inizialmente fluido vetrifica subito.

Per $T < T_{gr}$: il sistema non è inizialmente liquido ma vetrificato a basso peso molecolare. Tale stato è stabile e cioè non muta, a meno che non ci sia riscaldamento, con conseguente liquefazione.

La temperatura di immagazzinamento del polimero è mantenuta generalmente intorno a questi ultimi bassi valori. L'immagazzinamento può avvenire anche per temperature di poco superiori a Gel Tg ma per tempi massimi limitati.

Per una operazione di curing efficace occorre operare ad una temperatura maggiore di $T_{g\infty}$: si ottengono in questo modo le proprietà ottimali della matrice. Se però la $T_{g\infty}$ supera i limiti di stabilità termica della resina, non sarà possibile operarne una conversione chimica completa.

Nel caso delle resine epossidiche che stiamo considerando, il prodotto finale che si ottiene al termine della polimerizzazione ha buone caratteristiche meccaniche, ottima capacità di adesione alle fibre del composito, resistenza agli agenti chimici, basso ritiro nel passaggio di stato liquido-solido, e quindi bassa tendenza alla formazione di tensioni interne residue.

Le resine in commercio differiscono tra loro essenzialmente per la temperatura di curing che viene prevista in generale su tre diversi valori: 60°C, 121°C, 177 °C.

Per l'impiego a 60 °C viene garantito un tempo di gelificazione di circa 4 ore, cioè di transizione dallo stato totalmente fluido a quello di gel simile ad una gelatina non più fluida ma non completamente solida pur essendo dotata di un apprezzabile consistenza di forma.

Per l'impiego a 120°C e 177 °C il tempo di gelificazione va da 2 a 20 minuti. Ciascun tipo di resina è poi caratterizzato da un tempo di conservazione allo stato fluido alla temperatura di 25 °C, che va da un minimo di 3 giorni fino a 6 settimane. E' inoltre stabilito il tempo di gelificazione per ciascun tipo alla temperatura ambiente.

Questi prodotti sono inoltre classificati in base alle caratteristiche meccaniche finali post-curing determinate su lamine preformate di 4 per 6 pollici quasi isotrope, con 32, 36 fili di rinforzo.

Se ne distinguono 3 tipi: a bassa tenacità se inferiore a 193 MPa, a media tenacità se compresa tra 193 e 225 MPa, ed alta tenacità se superiore a 255 MPa. Vengono poi forniti per ciascun materiale i valori delle temperature massime di utilizzazione in opera.

Un inconveniente serio di queste resine è dato dal fenomeno dell'assorbimento, da parte di esse, di piccole quantità di acqua in relazione al peso della resina considerata. Questo fenomeno comporta una forte variazione dimensionale della matrice, una sua plasticizzazione, ed un abbassamento della temperatura di transizione vetrosa, con degrado delle caratteristiche meccaniche come la resistenza alla compressione e al taglio. Questi inconvenienti sono superabili mediante rivestimenti impermeabilizzanti.

Infine nella formazione di PMCs le resine epossidiche presentano i seguenti vantaggi:

1. ottimo legame fibra-matrice, quindi elevata resistenza al *debonding* ed alla *delaminazione*;
2. elevata resistenza meccanica ed alla frattura;
3. buona resistenza agli agenti ambientali e corrosivi;
4. basso ritiro post cura, quindi basse tensioni residue e/o distorsioni dei manufatti.

Gli svantaggi principali delle comuni resine epossidiche risiedono invece in quanto segue:

1. viscosità relativamente elevata, che rende non facile l'annegamento delle fibre nella matrice;
2. costo relativamente elevato;

3. bassa temperatura critica, variabile da una formulazione all'altra ma comunque in genere sempre inferiore a 180°-200° C circa.

Resine poliestere

Le resine poliestere, costituite da un poliestere non saturato disciolto in un monomero reagente (come lo stirene), sono comunemente utilizzate per la costruzione di compositi (con fibre di vetro, carbonio o aramide) per imbarcazioni, recipienti e condutture, dotati di buona resistenza ad agenti ambientali e corrosivi ad un costo limitato. Grazie ad un buon rapporto prezzo/qualità esse trovano larghissima applicazione nella produzione di componenti ed oggetti “non rinforzati” come rivestimenti, recipienti, tubi ecc. Nella formazione dei compositi, al contrario delle resine epossidiche, le resine poliestere presentano i seguenti vantaggi:

1. basso costo, generalmente non superiore a 2-3 euro/kg;
2. bassa viscosità, che consente un facile annegamento delle fibre;
3. proprietà fisico-meccaniche variabili entro un largo campo, che permette un facile adattamento alle specifiche esigenze di progetto;

In subordine esse presentano inoltre anche una:

4. buona resistenza ad agenti ambientali (UV) e corrosivi (oli, acidi deboli, petrolio ecc) che assicura durate anche superiori ai 30 anni, sebbene l'esposizione agli UV da luogo ad sensibile e progressivo scolorimento (ingiallimento) del materiale;
5. manifattura relativamente semplice che permette di limitare ulteriormente i costi di produzione del composito.

La durata e la resistenza agli agenti ambientali possono essere ulteriormente migliorati aggiungendo allo stirene (monomero reagente) del metil-metacrilato (MMA). E' così possibile ottenere un indice di rifrazione praticamente identico a quello delle fibre di vetro, che consente di ottenere elementi fibro-rinforzati perfettamente trasparenti alla luce. Gli svantaggi principali delle resine poliestere nella formazione di PMCs sono costituiti invece da:

1. debole legame fibra-matrice;
2. fragilità alle sollecitazioni di taglio;
3. ritiro piuttosto elevato (6-8%) durante la cura, che può compromettere sia la bontà della adesione fibra matrice, sia la stabilità dimensionale dei manufatti compositi;
4. temperatura massima di esercizio mediamente più bassa delle resine epossidiche, variabile tra 60 e 170°C circa.

L'elevato ritiro può essere contrastato somministrando additivi cosiddetti LPA (*Low-Profile Additives*) la cui formulazione e quantità va adattata opportunamente alle specifiche esigenze. Esiste una grande varietà di resine poliestere, ma in pratica solo 4 diversi tipi sono usati come matrice di compositi quali la:

1. *ortoftalica*, poco usata nelle applicazioni strutturali in quanto caratterizzata da bassa resistenza meccanica ($\sigma_r \leq 55$ MPa) e bassa resistenza agli agenti corrosivi;
2. *isoftalica*, avente la più elevata resistenza meccanica ($\sigma_r = 75$ MPa, $E=3400$ MPa) e buona resistenza alla corrosione, all'umidità e all'acqua (protegge bene le fibre di vetro);
3. *fumarico bisfenolo A (BPA)*, caratterizzata da modesta resistenza meccanica è usata esclusivamente in ambienti caustici per la elevatissima resistenza a tali agenti;
4. *clorendica*, avente come la precedente elevata resistenza in ambienti acidi ma bassa in ambienti basici; ha anche una buona resistenza al fuoco.

Proprietà meccaniche Le proprietà meccaniche sono spesso un fattore critico per selezionare una resina poliestere per una applicazione specifica.

Mentre le proprietà fisiche dei compositi in poliestere sono controllate in maniera predominante dai rinforzi, le proprietà fisiche della resina poliestere influenzano la durabilità e la resistenza alla temperatura.

Dati rappresentativi di getti puliti di resina poliestere sono mostrati nella tabella 1.17. Si deve notare che all'interno di ogni classe di resina, le modifiche vengono effettuate sul polimero. Tali modifiche compensano la resistenza alla temperatura per aumentare la tenacità. La tabella 1.17 evidenzia le differenze fra le classi di poliestere.

Le resine isoftaliche tendono a mostrare proprietà migliori a trazione e flessione rispetto alle resine ortoftaliche. Questo potrebbe essere dovuto al fatto che di solito le isoftaliche formano polimeri più lineari e ad alto peso molecolare rispetto alle ortoftaliche. Al contrario, le resine BPA e clorendiche sono composte per lavorare in ambienti altamente corrosivi e di conseguenza sono molto più rigide. Questi risultati in getti che sono fragili e hanno bassa resistenza a trazione e basso allungamento. La resina vinilica, a causa del suo contenuto di biossido di bifenolo, esibisce eccellenti proprietà di resistenza a trazione e a flessione bene come l'elevato allungamento.

Materiale	Durezza Barcol	Resistenza a Trazione [MPa]	Modulo di elasticità [GPa]	Allungamento %
Ortoftalica	...	55	3.45	2.1
Isoftalica	40	75	3.38	3.3
BPA	34	40	2.83	1.4
Clorendica	40	20	3.38	...
Vinilestere	35	80	3.59	4.0

Materiale	Resistenza a flessione [MPa]	Modulo a flessione [GPa]	Resistenza a compressione [MPa]	Heat-deflection Temperature [°C]
Ortoftalica	80	3.45	...	80
Isoftalica	130	3.59	120	90
BPA	110	3.38	100	130
Clorendica	120	3.93	100	140
Vinilestere	140	3.72	...	100

Tabella 1.17: Proprietà meccaniche di getti in resina poliestere

In generale, aumentando la lunghezza della catena dell'alcool diidrico si aumenta la flessibilità della resina. La stessa cosa avviene con gli acidi saturi. I gruppi aromatici, alcol diidrico o componente acido, aumentano la rigidità e la durezza.

L'uso di fibra rinforzata per produrre composito poliestere drammaticamente migliora sia le proprietà a trazione che a flessione. La tabella 1.18 elenca gli stessi 5 componenti della tabella 1.17; comunque, la tabella 1.18 mostra le proprietà meccaniche dei compositi in fibra di vetro in matrice poliestere. Le ultime due righe di tabella 1.19 mostrano l'influenza dell'orientamento delle fibre di vetro. Entrambe contengono 70 wt% di fibra di vetro, ma il composito unidirezionale mostra proprietà migliori di resistenza a trazione e un più alto modulo a flessione, quando viene testato lungo la direzione delle fibre di vetro.

Le proprietà dei compositi unidirezionali sono ancora più anisotrope che i tipici laminati di poliestere. Le proprietà meccaniche misurate trasversalmente rispetto alla direzione del vetro si avvicineranno a quelle osservate per i getti. La pultrusione o il *filament-winding* commercialmente producono compositi in poliestere utilizzando rinforzi unidirezionali. Questi si possono utilizzare in applicazioni strutturali dove la resistenza o la rigidità sono richieste in una sola direzione.

Materiale	Durezza Barcol	Resistenza a trazione [MPa]	Modulo di elasticità [GPa]	Allungamento %
Ortoftalica	...	150	5.5	1.7
Isoftalica	45	190	11.7	2.0
BPA	40	120	11.0	1.2
Clorendica	40	140	9.7	1.4
Vinilestere	...	160	11.0	...
Materiale	Resistenza a flessione [MPa]	Modulo a flessione [MPa]	Resistenza a compressione [MPa]	Impatto Izod [J/mm]
Ortoftalica	220	6.9	...	...
Isoftalica	240	7.6	210	0.57
BPA	160	9.0	180	0.64
Clorendica	190	9.7	120	0.37
Vinilestere	220	9.0	210	...

Tabella 1.18: Proprietà meccaniche dei compositi in fibra di vetro e resina poliestere (contenuto di fibre di vetro, 40 wt%)

Tipo di fibra di vetro	Contenuto di fibra di vetro, wt%	Densità [g/cm^3]	Resistenza a trazione [MPa]	Modulo di elasticità [GPa]	Allunga-mento %	Resistenza a flessione [MPa]	Modulo a flessione [MPa]	Resistenza a compres-sione [MPa]
Neat cured resin	0	1.22	59	5.4	2	88	3.9	156
Chopped-strand mat	30	1.5	117	10.8	3.5	197	9.784	147
	50	1.7	288	16.7	3.5	197	14.49	160
Roving fabric	60	1.76	314	19.5	3.6	317	15	192
Woven glass fabric	70	1.88	331	25.86	3.4	403	17.38	280
Unidirectional roving fabric	70	1.96	611	32.54	2.8	403	29.44	216

Tabella 1.19: Effetto del tipo e della quantità di fibra di vetro sulle proprietà meccaniche del composito in fibra di vetro

Come detto precedentemente, diversi tipi di rinforzi coinvolgono le proprietà meccaniche. Mentre l'E-glass è il rinforzo più utilizzato con le resine poliestere, si possono anche utilizzare S-glass, aramide, e fibra di carbonio.

Si utilizzano spesso riempitivi inorganici nei compositi in resina poliestere. Mentre migliorano la rigidità, come mostrato in un aumento del modulo, hanno dei piccoli effetti sulle altre caratteristiche di resistenza. Si utilizzano soprattutto per ridurre i costi.

Come previsto, le proprietà meccaniche ad alte temperature variano significativamente fra le classificazioni delle resine poliestere (Fig. 1.30). L'estrema rigidità e l'alta temperatura di transizione vetrosa (T_g), di BPA fumerico e clorendico poliestere risultano avere un'alta resistenza a flessione mantenuta fino a 120 °C. Le resine vinilestere presentano vantaggi prestazionali rispetto alle resine isoftaliche poliestere negli studi di fatica [4]. Il vantaggio del vinile era evidente a temperature elevate [5]. A 105 °C, i compositi in vinile e in poliestere isoftalico (60% di vetro) vengono stressati con cicli da 60 a 70 MPa. Dopo 200.000 cicli, il modulo a flessione cala solo del 5% per il vinile, rispetto al 12% per il poliestere isoftalico. Il rendimento termico dei vinilestere, in combinazione con le loro eccellenti proprietà meccaniche e la loro tenacità, spiega il motivo per cui essi sono spesso scelti come resina per compositi strutturali.

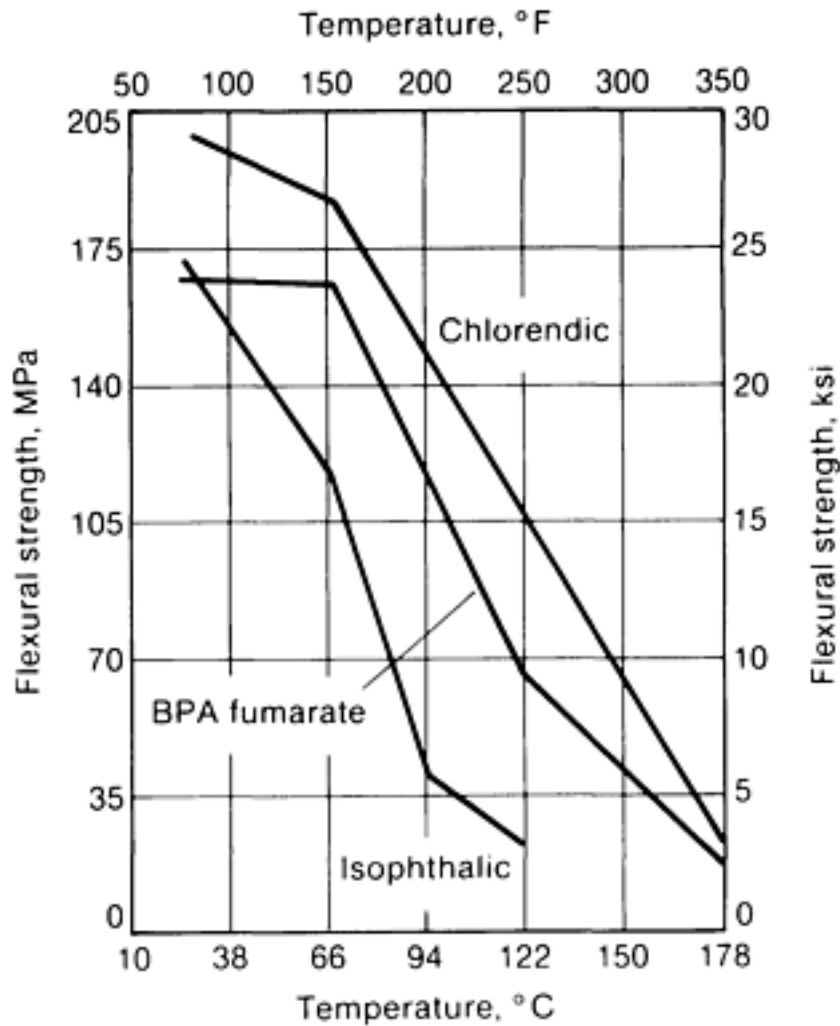


Figura 1.30: Resistenza a trazione vs temperatura, composti in vetro-poliestere con contenuto di vetro 40%

Resine poliestere ignifughe Tutti i materiali organici, compresi i poliesteri, si bruciano in presenza di una fiamma. In molte applicazioni, le resine poliestere sono tenute ad avere un certo grado di resistenza alla combustione. Questo può essere effettuato utilizzando un riempimento o una composizione speciale di resina poliestere ignifuga, a seconda del grado di resistenza richiesto.

L'aggiunta di un riempimento è il percorso più economico per la realizzazione di parti UPE ignifughe.

Tuttavia, l'aggiunta di un riempimento aumenta il peso e compromette la resistenza a trazione.

Integrare l'alogene in una resina poliestere è un modo efficace per migliorare la resistenza alla fiamma. Questo può essere realizzato utilizzando un acido dibasico alogenato, come l'anidride cloridica o anidride tetrabromoftalica, o l'alcool diidrico alogenato, come il dibromoneopentile glicole o il tetrabromobisfenolo A. A concentrazioni equivalenti, il bromo è molto più efficace del cloro. Gli additivi come l'antimonio e gli ossidi ferrosi agiscono come sinergizzanti con gli alogenati poliesteri e migliorano la loro resistenza alla fiamma [6].

La velocità di combustione e la generazione di fumo sono stati misurati utilizzando il tunnel di

prova Steiner (ASTM E 84). In questa prova, un gas bruciatore è posto ad una estremità di sezione 53 cm per 7,6 m. La distanza percorsa dalla fiamma e le quantità di fumo generate vengono misurate (dal oscuramento di un fascio fotoelettrico). Questi vengono confrontati con due valori standard: bordo color rosso quercia, a cui viene dato un punteggio di 100 per la fiamma e per la generazione del fumo, e il cemento amianto, a cui viene attribuito un punteggio pari a 0 per entrambi fiamma e generazione fumo. La generazione di fumo viene misurata con una camera di fumo NBS, che usa una cellula fotoelettrica per misurare l'accumulo di fumo in un ambiente chiuso. Il campione viene bruciato con o senza fiamma diretta. Quando la camera test NBS viene utilizzata, spesso si usa l'ASTM E 162, Indice della fiamma, per misurare questa variabile.

La tabella 1.31 confronta il rendimento di diverse resine utilizzando le suddette prove di fuoco e del fumo. In ognuna di queste prove, la resina alogenata chiaramente supera la resina ortoftalica. L'ossido ferroso riduce anche la generazione del fumo nella camera NBS rispetto all'ossido di antimonio.

Material or test	System		
	I	II	III
Material			
Resin	100 ^(a)	100 ^(b)	100 ^(c)
Alumina trihydrate	100	100	100
Antimony oxide	...	57	...
Ferrous oxide	...	...	5
Test method and property			
ASTM E 162			
Flame spread index	75	7	7
ASTM E 84			
Flame spread	120	23	25
Smoke emission	608	270	268
NBS chamber: flaming mode			
Maximum density	203	433	264
90 s density	2.5	18	11
240 s density	162	245	128
NBS chamber: nonflaming mode			
Maximum density	481	400	350
90 s density	1	1	5
240 s density	16	45	50

(a) Orthophthalic resin.

(b) HET acid resin A, 26% Cl.

(c) HET acid resin B, 26% Cl.

Figura 1.31: Performance dei compositi in matrice poliestere nei test di resistenza alla fiamma[13]

Il miglioramento di una resina ortoftalica con l'incorporazione di triidrato di allumina (ATH) è drammatica, la fiamma viene ridotto da 350 a 64.

Tuttavia, le resine alogenate raggiungono questo livello di prestazioni senza l'inserimento di qualsiasi riempitivo. Le resine alogenate con un sinergizzante mostrano solo una lieve riduzione della diffusione della fiamma quando viene aggiunto dell'ATH, ma l'emissione di fumo è notevolmente ridotta. Quando si confrontano le resine bromurate e clorate, il 26% Cl ha dato comparabili i risultati di fiamme e fumo come il 18% fr.

Resine fenoliche

Tali resine, ottenute dalla reazione del fenolo con la formaldeide in presenza di un catalizzatore acido o alcalino, presentano in sintesi gli stessi vantaggi delle resine epossidiche (buona adesione fibra-matrice, buona resistenza alla corrosione ecc) con in più la possibilità di operare a più alte temperature ed una migliore resistenza al fuoco con bassissima emissione di fumi tossici. Tale ultima proprietà li fa preferire in tutte quelle applicazioni (aeronautiche, navali, gallerie, metropolitane, condotte di gas ecc) ove la resistenza al fuoco è importante e soprattutto l'emissione di fumi tossici a seguito di incendio può portare grave nocimento alla vita umana. In questi campi le resine fenoliche stanno in pratica completamente sostituendo le altre resine. Gli svantaggi principali nella formazione dei compositi (fibre di vetro, carbonio o aramide) con resine fenoliche sono legati alla:

1. elevata pressione necessaria durante la cura (0.3-3 MPa a temperature di 120- 175° C);
2. alto contenuto di vuoti causato dall'allontanamento progressivo dei solventi necessari per contenere la viscosità della resina entro limiti accettabili;
3. caratteristico colore nero, che rende necessaria in molte applicazioni la verniciatura del prodotto con aumento del costo.

Preimpregnati Fenolici La soluzione del processo prevede l'impregnazione della fibra unidirezionale, del tessuto woven e non, con la resina fenolica avente viscosità da 0,3-1,0 Pa · s a 25 ° C con 40-75% di solidi. Metanolo, etanolo, isopropanolo, e chetoni sono solventi comuni. Per il processo di soluzione, il substrato viene passato attraverso un bagno contenente resina e poi in una torre riscaldata verticale o orizzontale per la rimozione del solvente, dell'acqua e del B-staging. I parametri di processo sono adeguati per raggiungere la combinazione di flusso, il contenuto di resina, l'adesività e i volatili desiderati. Il materiale trattato, chiamato prepreg, è rotolato per il magazzino e il trasporto. I preimpregnati fenolici offrono una vita di magazzino sensibilmente più lunga rispetto ai preimpregnati epossidici, a causa della natura chimica dei composti fenolici. I preimpregnati vengono curati mediante calore (120-175 ° C) e pressione (345-3450 kPa) per preparare i laminati. I fabbricanti di preimpregnati fenolici sono Cytac-Fiberite, MC Gill, Hexcel, J. D. Lincoln, Lewcott Corporation, ed Aerocell.

Applicazioni convenzionali di soluzione a base di composti fenolici curati termicamente sono in componenti balistici. Proprietà tipiche vengono riassunte in tabella 4 [7]. I materiali compositi sono

stati preparati con resina non modificata (Borden SC1008, GP 445D05) e polivinile butirrale e con tessuto di aramide, S-vetro, o polietilene con peso molecolare ultra-alto. I materiali compositi vengono utilizzati in caschi, veicoli terrestri e aerei militari. Altre applicazioni tradizionali di una soluzione in prepreg includono compositi carbonio-carbonio. Il prepreg in fibra di carbonio a matrice fenolica viene curato e carbonizzato per realizzare compositi carbonio-carbonio [8]. Questi composti sono utilizzati quando le prestazioni ad alta temperatura sono critiche; le attuali applicazioni includono motori a razzo, componenti di motori aerospaziali, freni di aereo, freni delle auto da corsa.

Property	Value
Flexural strength (ASTM D 790), MPa (ksi)	620–690 (90–100)
Flexural modulus (ASTM D 790), GPa (10^6 psi)	28–31 (4.0–4.5)
Tensile strength (ASTM D 638), MPa (ksi)	415–485 (60–70)
Compressive strength (ASTM D 695), MPa (ksi)	485–620 (70–90)
OSU heat release (ASTM E 906)	
At 2 min, kW · min/m ²	15
At peak, kW/m ²	30
NBS maximum smoke density (ASTM F 814)	15 (max)

Tabella 1.20: Proprietà delle resine dei prepreg fenolici e dei compositi [7] e [9] Composito: 14-ply, 7781 glass, 30–32% resina, curata a 175 °C per 1 h a 1380 kPa

Honeycomb fenolici I preimpregnati fenolici basati su carbonio, aramide, o fibre di vetro vengono utilizzati come fogli faccia per *honeycomb Nomex* per la costruzione di pannelli *sandwich* per applicazioni aerospaziali, come linea di carico, pareti, cucine, soffitti e pavimenti.

La struttura a pannello sandwich è stata selezionata per il suo elevato rapporto resistenza-peso. Per l'addensamento, *honeycomb Nomex* viene anche trattato o con solvente o con resine fenoliche trasportate dall'acqua [10]. Non vi è alcuna resina supplementare che soddisfa il requisito di adesività, la bassa infiammabilità, e i requisiti per il trattamento del *Honeycomb Nomex*.

Per le applicazioni aerospaziali del *Honeycomb*, la resina fenolica per l'*Honeycomb* deve soddisfare i requisiti richiesti, come quelli specificati in MIL-R-9299C (ora annullato). Tale specifica viene richiamata per la valutazione delle proprietà meccaniche in camera termostata a 260 °C. Diverse resine commerciali, come ad esempio l'SC1008 (Borden), e la GP 5236, GP 445D05, e la GP 307T35 (Georgia-Pacific), hanno raggiunto i requisiti delineati da questa specifica. Le proprietà di compressione, trazione, e flessione dei laminati in fibra di vetro a matrice fenolica (contenente almeno 14 strati) soddisfino i requisiti specifici della MIL-R-9299C e sono simili a quelli riportati per i compositi a matrice epossidica e poliestere [11,12]. I pannelli sandwich basti su *Honeycomb Nomex*, fogli di prepreg, e film decorativi in *Tedlar* (fluoruro di polivinile) vengono utilizzati per i soffitti e le pareti laterali degli interni di aeromobili (specifiche Boeing 8–222).

Il processo di fabbricazione a nido d'ape: un foglio di aramide viene utilizzato per la fabbricazione dell'*Honeycomb* non trattato. Il nido d'ape è rivestito con più strati di resina fenolica per l'addensa-

mento del cuore del nido d'ape. Utilizzando fogli di composito a matrice fenolica per compositi a matrice epossidica con un cuore a nido d'ape, si può ottenere i migliori rapporti resistenza / peso e rigidità / peso per molte configurazioni. I requisiti chiave per i pannelli aerospaziali sono il basso rilascio di calore, basso fumo, e l'alta resistenza al *peel* (adesione di prepreg curati ai Nomex). Per gli interni di aerei continueranno ad aumentare i requisiti di resistenza e di infiammabilità, e le resine fenoliche modificate che raggiungono un'elevata resistenza superficiale e mantengono un'elevata resistenza alla fiamma caratteristica delle resine fenoliche, continueranno a svilupparsi [12].

Pultrusione Fenolica La pultrusione è un processo a costo-effettivo che prevede compositi su base continuativa. Le fibre sono tirate attraverso un bagno di resina e poi attraverso una matrice riscaldata. Alla fine della matrice, il composito curato e sufficientemente rigido viene tirato e tagliato alla lunghezza desiderata. Le resine più comunemente utilizzate sono le resine poliestere insature e le vinilestere con catalizzatori di perossido; questi composti sono utili in applicazioni marine, per trasmissione di potenza, e nelle costruzioni. Le resine fenoliche vengono utilizzate per la fabbricazione di materiali compositi pultrusi quando è necessaria una bassa infiammabilità. Le resine termo-curate (senza catalizzatore esterno) e curate con formaldeide vengono correttamente convertite in compositi pultrusi. Le resine fenoliche con viscosità di $2-10 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ e da 68 a 75% di solidi vengono trattate con le attrezzature per la pultrusione [14,15,16]. La gamma di viscosità desiderata per il processo viene realizzata attraverso l'acqua residua, il monomero di fenolo, e / o l'etanolo. A causa della bassa viscosità, i riempitivi (argilla, borato di zinco, e / o alluminio triidrato) al livello 10-20% può essere utilizzato per ottenere una superficie liscia. Rispetto alle poliestere, le parti pultruse a matrice fenolica contengono un volume di fibra superiore (a causa della perdita del solvente e per contrastare l'intrinseca fragilità dei fenolici); tuttavia, le proprietà meccaniche sono simili [14]. Le proprietà meccaniche dei compositi pultrusi fenolici e poliestere vengono confrontate nella tabella 1.21 [14].

Property	Phenolic	Polyester
Tensile strength, MPa (ksi)	310 (45)	483 (70)
Flexural strength, MPa (ksi)	359 (52)	607 (88)
Compressive strength, MPa (ksi)	352 (51)	310 (45)

Tabella 1.21: Proprietà dei compositi pultrusi in fibra di vetro a matrice fenolica e a matrice poliestere [14]

Nel processo di pultrusione dei fenolici, Strongwell ha condotto ampie ricerche e ha fabbricato griglie a matrice fenolica per piattaforme petrolifere *offshore*. La griglia è in grado di sopportare il contatto diretto della fiamma, senza grandi danni strutturali. Inoltre, essa ha una bassa conducibilità termica, la resistenza di una griglia in acciaio con un peso minore.

La griglia a matrice fenolica è in grado di sopportare il carico 1.75 volte rispetto ad una equivalente griglia in acciaio. Questa combinazione di proprietà non era disponibile con materiali alternativi

a matrice organica. Pertanto, la griglia a matrice fenolica ha sostituito la griglia in acciaio in più piattaforme petrolifere *offshore*.

Fenoliche per Filament Winding Il *filament winding* a matrice fenolica si è ben stabilito nel settore industriale. Le resine fenoliche-formaldeide con un catalizzatore acido e con delle resine resorcinole con un catalizzatore di paraformaldeide sono attualmente utilizzati. Il processo di *filament winding* con sistemi di avvolgimento fenolici è leggermente diverso, in linea di principio da altri sistemi di avvolgimento come il vinilestere, il poliestere e le resine epossidiche. Il trattamento comprende i seguenti requisiti:

- Viscosità della resina di viscosità $0,5-2,0 \text{ Pa} \cdot \text{s}$
- Quantità di vita per una miscela resina / catalizzatore che deve essere superiore a 30 min
- Tempo di gelificazione a 80°C che deve essere 90-150 s
- La temperatura di cura deve essere $65-95^\circ \text{C}$

I produttori di resina hanno sviluppato acidi latenti per il *Filament winding* di resine fenoliche [17,18,19,20].

Il catalizzatore latente dà una quantità di vita pari a quelle delle miscele in poliestere, pur mantenendo la velocità di cura richiesta dai fabbricanti. Dopo una cura a $50-80^\circ \text{C}$, i tubi in *filament-wound* garantiscono un adeguata robustezza, un adeguata stabilità dimensionale e la temperatura di transizione vetrosa (T_g) da $95-150^\circ \text{C}$. Se viene richiesta una T_g superiore, i tubi vengono rimossi dal mandrino e poi post-curati per un miglioramento della T_g . La tabella 1.22 mostra lo sviluppo della T_g con un tubo curato in *filament-wound* [21].

Property	Polyester	Latent acid cured phenolic
Resin content, %	43.1	38.7
Flexural strength, MPa (ksi)	460 (66.7)	386 (56.0)
Flexural modulus, GPa (10^6 psi)	10.5 (1.53)	15.9 (2.3)
Glass-transition temperature (T_g), $^\circ\text{C}$ ($^\circ\text{F}$)	120 (250)	120 (250)
After postcure ^(a)	130 (270)	155 (310)
After postcure ^(b)	135 (275)	205 (400)
After postcure ^(c)	140 (280)	230 (450)

(a) 30 min at 150°C (300°F).

(b) 30 min at 150°C (300°F) + 30 min at 175°C (350°F).

(c) 30 min at 150°C (300°F) + 30 min at 175°C (350°F) + 30 min at 205°C (400°F)

Tabella 1.22: Proprietà a flessione e temperature di transizione vetrosa per tubi in *filament-wound*

Grazie alla maggiore resistenza al fuoco, i compositi a base fenolica-formaldeide in *filament-wound* sono attualmente utilizzati per i condotti di ventilazione nel settore minerario e per i tunnel. I tubi sono utilizzati nell'industria mineraria per portare il metano. Oltre ad essere resistenti al fuoco, essi sono estremamente leggeri da maneggiare (circa un quarto del peso del acciaio), e l'installazione è fino a sei volte più veloce rispetto a quelli per l'equivalente tubo in acciaio.

Fenoliche nei Sheet Molding Compounds L'uso di fenolici per stampaggio di lamiere composti (SMC), è stato studiato dal 1980 [22]. La sfida tecnologica è stata adattare la viscosità della resina, la manipolazione, e le proprietà di cura del poliestere SMC per evitare qualsiasi trattamento speciale e qualsiasi modifica delle attrezzature ai fabbricanti e agli utenti finali. Entrambi sia i fenolici con acido catalizzato e sia quelli con base catalizzata devono essere studiati. Un sistema ad acido-catalizzato non è accettabile a causa della corrosione degli stampi in poliestere esistenti. Per i processi SMC, i requisiti della resina sono la bassa viscosità (superiore a $1,5 \text{ Pa} \cdot \text{s}$, a 25°C), alti solidi (inferiore al 75%), e livelli minimi di monomeri (fenolo, formaldeide) e solventi (acqua, alcool). Il prodotto in SMC è affinato / maturato per raggiungere il flusso desiderato per lo stampaggio. Il periodo di maturazione dipende dal livello e dal tipo di catalizzatori.

Resine viniliche

Appartengono alla famiglia delle resine poliestere e pertanto presentano le stesse peculiarità di queste (bassa viscosità, buona resistenza agli agenti corrosivi) ma unite ad una migliore resistenza meccanica ($\sigma_r = 80 \text{ MPa}$, $E = 3600 \text{ MPa}$) ed agli agenti ambientali sebbene con costo più elevato. La temperatura critica è di circa 120°C . Nella formazione dei composti danno luogo ad un legame fibra-matrice più forte, quindi a composti più efficienti specie in termini di resistenza a fatica, alla frattura ecc. Il costo più elevato (intermedio tra quello delle poliestere e quello delle resine epossidiche) e l'impossibilità di variare le caratteristiche (viscosità, ecc) ne fa però un materiale poco flessibile e di uso relativamente limitato rispetto alle altre poliestere.

Resine poliimmidiche

I materiali poliimmidici si possono classificare in quelli che hanno un elevata temperatura di esercizio che in condizione di esposizione per lungo periodo può arrivare ad un limite massimo di 230°C , e in quelli che nel caso di uso prolungato possono arrivare fino a 315°C . Le bismaleimmidi, i fenoletinili contenenti poliimmidi, e alcuni poliimmidi condensati come l'Avimid-K3 appartengono alla prima categoria, mentre quei materiali, quali il PMR-15, Larc-TPI, Avimid-N e BPDA / TFMB che rientra in quest'ultima. In termini di chimica, vi sono due tipi generali di poliimmidi commerciali: termoplastici poliimmidi, derivato da una reazione di condensazione tra anidridi o derivati di anidridi e diammine e poliimmidi reticolanti, derivati da una reazione di addizione tra gruppi insaturi di un monomero o oligomero di imide preformato. I monomeri o gli oligomeri immidici sono anche derivati dalla reazione tipica di condensazione che serve per formare il gruppo immidico, ma la formazione del polimero deriva dalla reazione di addizione.

Proprietà e applicazioni I vantaggi e gli svantaggi dei due tipi di poliimmidi sono riassunti in tabella 1.23. Ci sono conclusioni generali riguardanti ogni tipo, perché ci sono delle eccezioni, che dipendono dalla struttura chimica.

Tipo di poliimide	Vantaggi	Svantaggi
Condensazione (termoplastici)	Termoplastici (ritrattabilità)	scarsa lavorabilità
	Limita l'alta temperatura di transizione vetrosa (T_g)	Rilascio di elementi volatili durante il processo
	Tenacità	Elevate pressioni richieste nel processo
	Eccellente stabilità termica e termo-ossidante	
Tipo-additivo (reticolante)	lavorabilità	Limitata riprocessabilità
	reticolante	fragilità
	Alta T_g	Scarsa stabilità termica e termo-ossidante
	Nessun elemento volatile rilasciato durante il processo	
	Bassa pressione richiesta nel processo	

Tabella 1.23: Attributi generali dei poliimidi (termoplastici) e dei poliimidi addizionati (reticolanti)

I poliimmidi condensati, che sono polimeri termoplastici a catena lunga lineare, hanno alta viscosità allo stato fuso, così che richiedono alte pressioni e temperature per un stampaggio della resina o per la fabbricazione dei compositi. Comunque, la natura altamente aromatica di questi sistemi con gruppi flessibili, come ad esempio l'etere, esafluoruro propilidene, o il metilene dentro la struttura portante, porta ad avere materiali con una buona tenacità, eccellente stabilità termica e stabilità termo-ossidante, e limita l'alta temperatura di transizione vetrosa (T_g).

I poliimmidi del tipo addizionati, derivati da oligomeri preformati, sottoposti ad un legame atomico termico o l'estensione della catena a formare i termoindurenti. Il peso molecolare del oligomero controlla la lavorabilità, il grado del legame atomico o l'estensione della catena, e la T_g . Tuttavia, poiché elementi volatili non vengono liberati durante la lavorazione e gli oligomeri hanno una regione fusa e morbida in cui la viscosità è relativamente bassa vicino alla regione in temperatura in cui si verifica la reazione di addizione, limita la bassa pressione che è necessaria durante la lavorazione per consolidare la parte che deve essere costruita.

I poliimmidi vengono utilizzati in applicazioni strane a causa delle loro proprietà insolite. I poliimmidi derivati da dianidridi aromatiche e diammine aromatiche contenenti unità stabili flessibili nella struttura portante presentano:

- Stabilità termica e termo-ossidante termica fino a 400 ° C
- Eccellenti proprietà meccaniche, sia a temperatura ambiente che a temperature elevate
- Capacità di formare fibra e film
- Eccellenti proprietà di adesione, sia a temperatura ambiente che a temperatura elevate

- Ininfiammabilità-non sosterrà la combustione

I poliimmidi contenenti fluoro mostrano le proprietà elencate in precedenza, come pure una bassa costante dielettrica. I poliimmidi contenenti gruppi funzionali o in sospensione nella struttura portante della dianidride aromatica e / o diammina mostrano alcune delle proprietà elencate in precedenza, così come la permeabilità del gas selezionato.

Dalla metà degli anni 1980, le aree di applicazione per i poliimmidi stanno continuamente crescendo. Questo è dovuto al fatto che hanno la capacità di variare la struttura polimerica, adattando così le proprietà per applicazioni specifiche.

I prodotti poliimmidici vengono utilizzati in un'ampia gamma di applicazioni, quali rivestimenti, adesivi, matrici di compositi, fibre, film, schiume, moldings, membrane, display a liquido cristallino, e per l'isolamento. Ovviamente, la gamma di applicazioni per i poliimmidi è un buon indicatore della loro capacità di modificare la struttura molecolare per ottenere proprietà specifiche. Centinaia di materiali poliimmidici sono stati sintetizzati nel corso degli anni, ma solo pochi sono disponibili in commercio al momento attuale. Tuttavia, molti poliimmidi sono disponibili presso ditte chimiche specializzate.

Le proprietà termiche della poliimmidi dipendono dalla presenza di unità flessibili, come ad esempio etere, isopropilidene, di metilene, esafluoruro propilidene e carbonile nella struttura portante della catena polimerica, o gruppi sospesi nel lato ingombrante della struttura portante. Questi gruppi possono anche influenzare la solubilità. L'interruzione della regolarità da parte della copolimerizzazione di due dianidridi con due diammine colpisce anche la solubilità.

Una considerazione importante per la selezione di un poliimide per l'applicazione in un composito è la tenacità della resina. Una interessante correlazione della tenacità della resina resistenza contro una stima dei costi è indicato nella tabella 1.24. Il polietere imide (PEI) l'Ultem ha la correlazione più favorevole tenacità / costi. Come con tutti i poliimmidi, queste proprietà devono essere equilibrate tra le altre proprietà, come la lavorabilità, T_g , la temperatura potenziale, e le proprietà meccaniche.

Resin type	Interlaminar fracture toughness (G_{Ic}) at 23 °C (73 °F)		Approximate cost		Toughness per unit cost ^(a)
	J/m ²	ft · lbf/ft ²	\$/kg	\$/lb	
PETI-5	4800	330	230	500	2
Avimid-K3B	1400	100	45	100	31
Avimid-N	2500	170	180	400	14
PMR 15	300	20	30-40	70-90	8-10
AFR 700B ^(b)	2500?	170?	180	400	14
BMI	330	20	70	150	5
Ultem (PEI)	~5000	~340	3	6	1667

(a) Interlaminar fracture toughness (G_{Ic}) in J/m² divided by cost in \$/kg.

(b) Toughness value listed with a question mark in source.

Tabella 1.24: Relazione tra tenacità della resina e costo [23]

Resine cianato-estere (policianurati)

Introduzione Le resine cianato-estere sono una famiglia di resine termoindurenti ad alta temperatura in modo più accurato chiamati policianurati-che colmano il divario in termini di prestazioni termiche tra epossidiche e poliimmidi ad alta temperatura. In aggiunta alle loro eccellenti prestazioni termiche, le resine CE hanno caratteristiche più desiderabili che giustificano il loro costo più elevato in molte applicazioni. Posseggono delle proprietà equilibrate e sono particolarmente importanti per la loro bassa costante dielettrica e le perdite dielettriche, a basso assorbimento di umidità, basso restringimento, e le basse caratteristiche di degasamento. Nonostante il loro costo relativamente elevato hanno trovato ampie applicazioni in elettronica, circuiti stampati, TV satellitare e aerospaziale, materiali compositi strutturali, e radar. Possono essere composte per l'impiego come adesivi ad alte prestazioni, schiume sintattiche, *honeycomb*, e compositi fibro rinforzati e sono spesso trovati in miscele con altre resine termoindurenti come le epossidiche, bismaldeidi, e termoplastiche [24].

Proprietà e caratteristiche Molte delle buone caratteristiche delle resine CE sono in contrasto con quelle delle resine epossidiche e sono direttamente collegate alla struttura chimica della resina. La caratteristica più interessante della chimica della CE si evince dalla struttura della matrice curata. Mentre vi sono differenze in termini di prestazioni a seconda della struttura portante e della composizione, tutte le forme contengono una bassa concentrazione di dipoli e di gruppi idrossili nella struttura curata. Essi possono avere anche una bassa densità della *cross-link* e un elevato volume libero. Questo si tradurrà in un minore assorbimento dell'umidità, una più elevata diffusività, basso restringimento durante la cura, basso coefficiente di espansione termica (CTE), e bassa costante dielettrica e perdita dielettrica se confrontati con resine epossidiche e bismaldeidi (BMI). Questi attributi sono particolarmente attraenti per strutture stabili, PCB, e radar e per applicazioni a basso dielettrico. Il tasso di assorbimento dell'umidità confrontato tra le CE e le resine epossidiche mostra che la CE raggiunge l'equilibrio dell'umidità in modo più rapido e con un livello di assorbimento totale molto più basso. Ciò si riflette anche in generale sul coefficiente di assorbimento di umidità delle resine CE che è più basso rispetto alle resine epossidiche.

Il modulo e la tenacità della resina sono caratteristiche che dipendono, in parte, dalla struttura portante e dalla densità *cross-link* del polimero. Per strutture satellitari, il miglioramento della tenacità e dell'allungamento a rottura fanno sì che ci sia un minor numero di microcracks a causa dei cicli termici e di una struttura più stabile. La Figura 1.32 confronta i microcracking di diverse resine CE e epossidiche, molti dei quali sono qualificati per i sistemi spaziali. I laminati sono stati costruiti utilizzando XN-70A, con una fibra con modulo pitch di 690 GPa (100×106 psi) al 60% di volume di fibra. Le resine CE producono un minor numero di microcracks globali dopo 2000, cicli, con il rapido aumento della densità dei microcrack da zero a 500 cicli e poi si stabilizzano. L'eccezione a questa stabilizzazione è la più bassa temperatura di cura delle epossidiche (130°C), che sembra continuare i microcracking dopo i 2000 cicli.

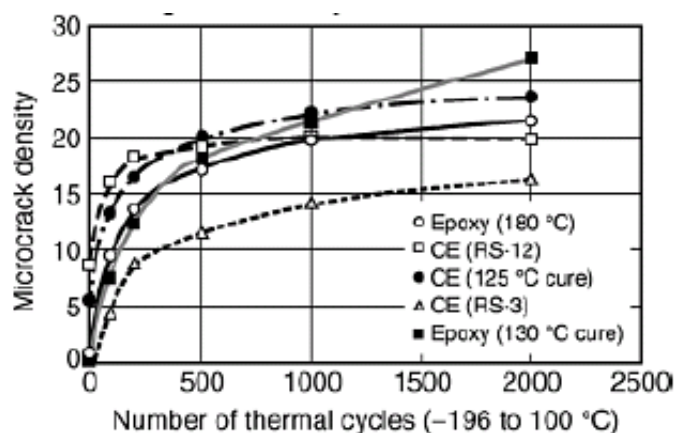


Figura 1.32: Confronto del comportamento dei microcracking dei laminati in resine cianato-estere e in resine epossidiche (rinforzati con fibra di grafite XN70A, modulo > 690 GPa). Fonte: Nippon Graphite Fiber Corporation

Le resine cianato-estere possono essere tenacizzate dagli stessi meccanismi utilizzati per le resine epossidiche, con il cambiamento previsto nell'equilibrio del modulo, della T_g , e dell'allungamento a rottura. La capacità di modificare e tenacizzare le resine a base di CE li rende appropriati per gli adesivi e le applicazioni in compositi tenaci. E' molto efficace migliorare la tenacità a frattura (CCI) della matrice a basse concentrazioni senza ridurre notevolmente la T_g della resina.

Le resine di cianato-estere offrono ottime prestazioni rispetto alle altre resine termoindurenti. Attualmente, l'uso della resine cianato-estere in materiali compositi è stato limitato dal loro costo elevato. Nuovi sviluppi, per resine CE, sono incentrati su soluzioni a basso costo per sintetizzare le resine, le miscele di resina, i copolimeri e per capire completamente il meccanismo di cura che permetta basse temperature di cura con elevate conversioni. Inoltre, il lavoro viene svolto per individuare modifiche per avere un minore assorbimento di umidità, un basso coefficiente di espansione dell'umidità ed il miglioramento delle proprietà dielettriche. Durante lo sviluppo delle nuove resine CE, un settore che continua ad essere studiato, per i cambiamenti nella struttura portante, è la chimica. Questo lavoro è in corso per descrivere differenti strutture polimeriche con gruppi funzionali cianato e caratterizzarne le proprietà, che consentono nuovi impieghi o il miglioramento delle proprietà delle resine CE.

Resine ammidiche

Le due più importanti classi di resine ammidiche sono i prodotti ottenuti dalla reazione di policondensazione dell'urea e della melamina con la formaldeide. Sono spesso considerate congiuntamente in virtù del fatto che la loro produzione e le loro applicazioni sono molto simili. Le resine melamminiche hanno in generale proprietà migliori ma sono anche più costose.

Sia la melamina, un trimero della cianoammide, sia l'urea reagiscono con la formaldeide, in un primo tempo con reazioni di poliaddizione che danno come prodotti dei composti metilolici e quindi con reazioni di policondensazione molto simili a quelle del fenolo con la formaldeide.

La produzione delle resine ammidiche è molto simile a quella delle resine fenoliche. Dal momento che la resina allo stadio-A è solubile in acqua, è solo parzialmente disidratata e la soluzione acquosa viene usata per impregnare il rinforzo. Queste resine sono molto spesso riempite con cellulosa. L'impregnazione viene eseguita in un miscelatore sotto vuoto e la successiva fase di essiccamento porta la resina nello stadio-B. A questo punto un ulteriore passaggio della resina in un appropriato miscelatore permette di ridurre le particelle della resina alle dimensioni volute.

Un vantaggio delle resine ammidiche rispetto alle resine fenoliche consiste nel fatto che le prime sono trasparenti e non colorate cosicché è possibile produrre, attraverso l'utilizzo di appropriati coloranti, oggetti di colori molto chiari o pastello.

Le proprietà meccaniche delle resine ammidiche sono generalmente migliori di quelle delle resine fenoliche ma la loro resistenza al calore e all'umidità è decisamente peggiore (seppur ancora molto buona, come nel caso di tutte le resine termoindurenti).

Circa i tre quarti delle resine ammidiche sono usate come adesivi per ricoprire compensati e mobilia. Il restante quarto della produzione è diviso tra le resine utilizzate per i trattamenti tessili e quelle utilizzate per i "coatings". Le resine prodotte con la melamina hanno caratteristiche migliori, ma per ragioni di economia sono spesso mescolate con resine prodotte con l'urea. Il riempimento usato per le ultime è sempre la cellulosa mentre per le prime si usa oltre alla cellulosa anche vetro, silice o cotone.

A causa delle loro peggiori proprietà viscoelastiche, le resine prodotte a partire dall'urea sono spesso formate per compressione anche se oggi è abbastanza comune l'utilizzo di formatura ad iniezione per entrambe le famiglie di resine.

Le resine ammidiche alterano le proprietà delle fibre tessili (come, tipicamente, il cotone) migliorando la rigidità, la resistenza allo sfilacciamento, la repellenza all'acqua e abbassando l'infiammabilità.

Resine silconiche

Come il carbonio, anche il silicio ha la capacità di formare legami covalenti. Gli idrosilani fino al Si_6H_{14} sono presenti in natura: all'aumentare del numero di atomi di silicio presenti nella catena il legame silicio-silicio diviene instabile e quindi non esistono polimeri costruiti a partire da idrosilani.

I polimeri a base di silicio noti commercialmente sono costruiti a partire da legami silicio-ossigeno-silicio che risulta molto più stabile del semplice legame silicio-silicio. Un'altra caratteristica che differenzia il silicio dal carbonio è l'incapacità del primo, al contrario del secondo, a formare doppi o tripli legami. Questo implica la impossibilità di formare polimeri silconici se non attraverso reazioni di policondensazione.

I polimeri silconici sono prodotti a partire da intermedi organosilconici di formula generale $\text{SiR}_n\text{X}_{4-n}$ dove R è un gruppo alchilico o arilico e X è un gruppo che può essere idrolizzato a dare un SiOH . Questi intermedi di reazione sono prodotti a partire dal silicio che viene a sua volta prodotto dalla riduzione del quarzo in opportuni forni. Gli intermedi sono prodotti in una sintesi in cui i gruppi

R ed X sono attaccati in modo simultaneo al silicio attraverso una reazione che avviene a temperature molto elevate in presenza di catalizzatori metallici.

I prodotti che si possono ottenere da reazioni di questo tipo sono molteplici e variano dai liquidi alle cere e ai grassi fino alle resine e alle gomme.

Al contrario di quanto avviene nel caso delle gomme siliconiche o dei fluidi siliconici, nel caso delle resine siliconiche gli atomi di silicio contengono al più un sostituito organico. Il processo di reticolazione, che risulta abbastanza delicato, permette di ricavare resine caratterizzate da rigidità estremamente diverse.

Le resine siliconiche sono usate prevalentemente come vernici isolanti e come agenti impregnanti e incapsulanti. Un vasto uso di questi materiali viene fatto anche nelle vernici industriali.

Resine alchidiche

Le resine alchidiche sono poliesteri usati prevalentemente nel campo delle vernici organiche. Tra tutte le composizioni possibili quella sicuramente più comune è basata sull'utilizzo di anidride ftalica e glicerolo. Molte resine alchidiche sono modificate attraverso l'aggiunta di acidi grassi ricavati da oli vegetali o animali. Se questi acidi sono insaturi le resine che ne risultano sono del tipo che si asciuga all'aria.

Possono essere suddivise in due famiglie: le resine "lacquer", che prevedono nella fase di polimerizzazione soltanto la evaporazione del solvente, e quelle "varnish" in cui la polimerizzazione è accompagnata da reazioni chimiche tra i componenti.

1.2.4 Matrici termoplastiche

Rispetto alle resine termoindurenti le resine termoplastiche offrono una più elevata "duttilità", ovvero una più elevata resistenza all'urto. Esse pertanto sono preferite in tutti quei casi in cui la resistenza all'urto ed alla frattura è un requisito essenziale del progetto come accade, per esempio nelle costruzioni aeronautiche civili. Pure molto apprezzata è l'ottima resistenza alle basse temperature (applicazioni criogeniche).

L'inconveniente principale ne limita drasticamente l'uso è l'elevata viscosità alle basse temperature che rende complicata e costosa la preparazione di compositi fibro-rinforzati. Sebbene la viscosità in alcuni casi possa essere abbassata mediante uso di opportuni solventi, questi possono degradare le proprietà della resina. Anche il riscaldamento può avere simili effetti (abbassamento della viscosità e degrado) e pertanto nella formazione dei compositi il riscaldamento deve essere pure opportunamente limitato utilizzando al tempo stesso una sufficiente pressione di lavorazione. Per le comuni resine termoplastiche utilizzate nei compositi la lavorazione avviene a temperature medie di circa 350° e pressione intorno a 1.5-2 MPa.

Le resine termoplastiche offrono anche elevata resistenza all'usura ed ottime proprietà dielettriche pressoché invarianti con l'umidità. Per quest'ultima proprietà esse sono preferite nella costruzione di dispositivi elettronici esposti all'umidità ed all'acqua e nella realizzazione dei radar. Allo stato

attuale, tra le varie resine termoplastiche le più utilizzate nella formazione dei PMCs, specie in campo aeronautico, sono in ordine di importanza:

1. il PEEK (polyether etherketone), che è la resina termoplastica in assoluto più utilizzata per compositi high-performance, caratterizzata da elevata resistenza alla frattura, bassissimo assorbimento di acqua (inferiore a 0.5%, molto più basso delle epossidiche);
2. il PPS (polyphenylene sulfide), che è una resina semicristallina caratterizzata da elevata resistenza chimica;
3. il PSUL (polysulfone), che è una resina amorfa caratterizzata da elevata deformabilità ed eccellente stabilità in ambienti umidi e/o caldi;
4. il PEKK (polyetherketone ketone),
5. il PEI (polyetherimide), che è una poliammide termoplastica con temperatura di transizione relativamente elevata;
6. il PAI (polyamide-imide), simile alla precedente,
7. il K-III, che è un prepolimero in opportuno solvente, usato per proteggere le fibre;
8. il LARC-TPI, simile al precedente

Con queste resine si producono prepreg e semipreg (la matrice riveste le fibre piuttosto che impregnarle completamente) disponibili in commercio ovviamente non sotto forma di rotoli, come avviene per i prepreg con matrice termoindurente, bensì sotto forma di fogli di dimensioni di circa 100 x 350 cm.

Solitamente con il PEEK si ottengono lamine unidirezionali, mentre con PEI e PPS si producono anche lamine bidirezionali. Queste sono utilizzate per la formazione di componenti di varia forma con tecniche analoghe a quelle usate nella formatura dei laminati metallici (vedi per esempio Fig. 1.33).

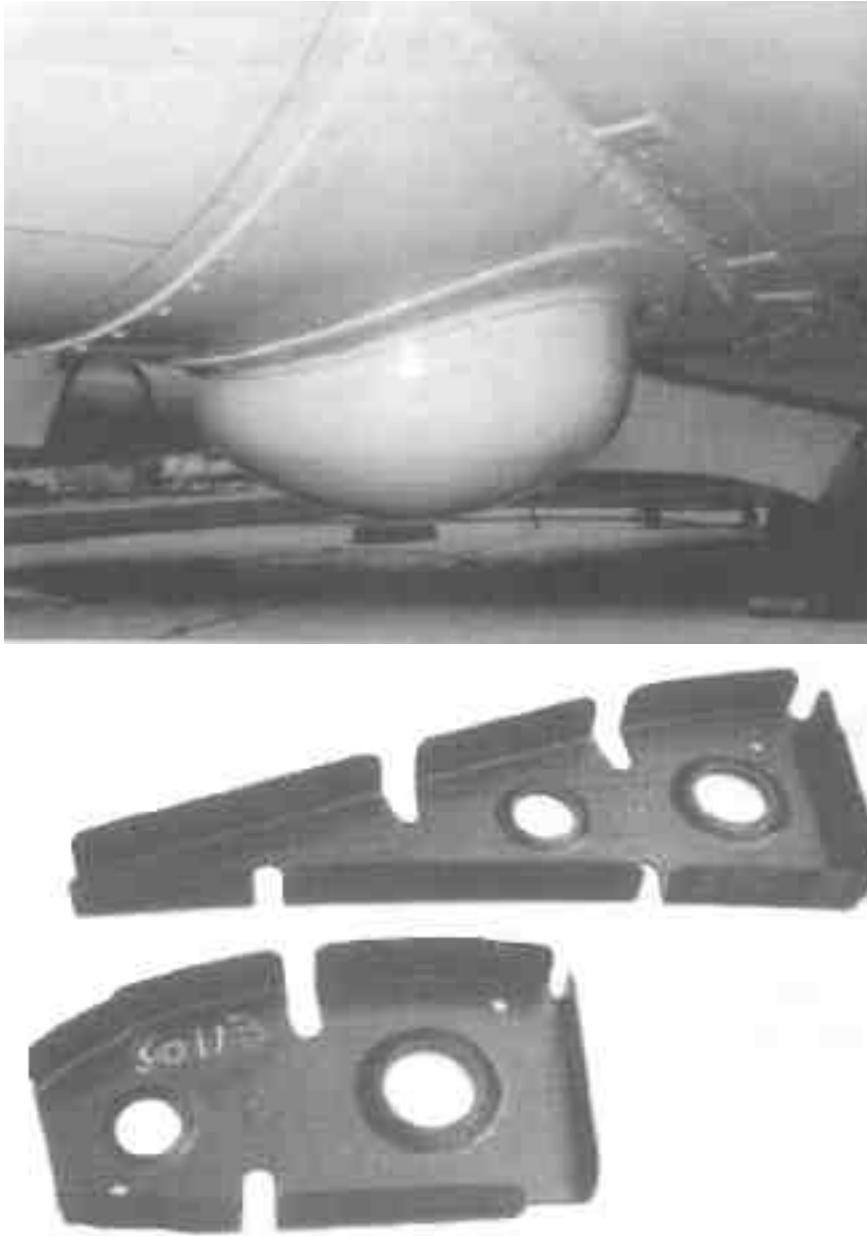


Figura 1.33: Compositi con matrice termoplastica: (a) radar di velivolo ed (b) elementi stampati.

Il progressivo rammollimento delle resine termoplastiche consente di ottenere la giunzione di elementi diversi senza rivetti o bulloni mediante “saldatura”, cioè mediante riscaldamento anche locale (ad induzione, a resistenza con filo interposto ecc) della parti da unire ed applicazione di una sufficiente pressione. Ove il riscaldamento possa risultare difficoltoso, questo può essere limitato interponendo tra le superfici da giuntare un sottile strato di PEI che ha una temperatura di rammollimento più bassa delle altre resine ed ottima compatibilità con le altre resine termoplastiche.

Forme dei Prodotti

Materiali compositi termoplastici sono disponibili in una varietà di forme, come lo sono i compositi termoindurenti, anche se ci sono differenze significative. Una di queste è che il tessuto preim-

pregnato rinforzato termoplastico in genere viene venduto sotto forma di foglio discontinuo, piuttosto che in forma rotolo. Le dimensioni usuali sono da 107 a 366 centimetri. Inoltre, le forme di tessuto vengono spesso vendute come prodotti laminati consolidati che comportano un certo numero di strati standard o con orientamenti personalizzati dei ply. Unidirezionale prepreg è stato venduto in forma di rotoli, ma con una larghezza massima del rotolo di un quarto a un quinto quelle tipiche dei prepreg termoindurenti. La larghezza standard è stata 30,5 centimetri, ma quasi tutte le larghezze sono disponibili. *Slit tape* e fasci singoli sono diventati comunemente disponibili.

Per varie ragioni, non tutte le combinazioni di resina termoplastica / rinforzo sono attivamente commercializzate. E' comune infatti trovare PEEK applicato al materiale unidirezionale, ma non materiale tessuto. Polietereimide e PPS, dall'altro canto, sono più comunemente commercializzati con forme in tessuto.

Impregnazione

Le operazioni usate per combinare assieme le resine termoplastiche con le fibre di diametro fine sono sia una scienza che un'arte. Essi sono il dominio delle società la cui attività è la fabbricazione e la commercializzazione di materiali prepreg o semipreg.

Semipreg è il termine spesso usato con materiali termoplastici, perché la resina può essere quasi più un rivestimento piuttosto che un impregnazione. Questo è più tipico dei rinforzi unidirezionali che dei tessuti.

L'impregnazione con resine termoplastiche è molto più difficile che con termoindurenti, perché in genere le resine termoplastiche sono molto più viscosi. L'aumento della temperatura riduce la viscosità, ma in alcuni polimeri la decomposizione può avvenire molto prima che si abbia bassa viscosità.

Molti termoplastici sono insolubili nella maggior parte dei solventi organici, o le loro proprietà sono notevolmente degradate dai tentativi di utilizzo di solventi. La conseguenza è che un'approfondita impregnazione può essere estremamente difficile.

Alcuni polimeri, tuttavia, sono facilmente solubili in solventi organici. Ciò consente un'impregnazione abbastanza convenzionale del solvente, ed è un metodo che è stato utilizzato per PEI compositi.

Quattro strategie sono state avanzate per far fronte a difficoltà di impregnazione. Due strategie coinvolgono più calore che i metodi meccanici e le altre due riguardano la realizzazione di termoplastici in una forma che consenta il mescolamento con le fibre prima del consolidamento della resina.

Uno dei metodi meccanici si basa sul fatto che il comportamento viscoelastico dei termoplastici non è Newtoniano [25]. Di conseguenza, è possibile ottenere una significativa riduzione di viscosità mediante il diradamento per taglio. Questo tipo di approccio potrebbe essere considerato per un polimero viscoso che è insolubile in qualsiasi solvente ambientalmente accettabile. Si ritiene che questo metodo non sia molto diffuso.

Il secondo, metodo meccanico più comune comporta l'impilatura di uno strato di film su tessuto. Il film è in resina riscaldata al di sopra della temperatura di fusione e forzata nel tessuto con la pressione, ad esempio da una pressa.

Una delle strategie di mescolamento implica il disegno o la filatura delle fibre della resina che poi sono mescolate con le fibre rinforzate [26]. Le fibre resinose miste a fibra vengono poi fuse o ammorbidite.

Se la commistione è sufficientemente realizzata, quindi un'impregnazione efficace viene raggiunta. Il processo per formare le fibre termoplastiche rappresenta un costo aggiuntivo, ma in termini di volume questo può essere un piccolo costo.

La seconda strategia di mescolamento coinvolge l'unione della resina in polvere con le fibre rinforzate. Metodi elettrostatici di attrazione vengono utilizzati in un processo di verniciatura a polvere. Il polimero viene quindi fuso per formare il prepreg [27,28]. Talvolta il materiale può essere venduto prima della fusione della resina, in modo che il drappaggio, la non adesività del materiale raggiunge la sua effettiva impregnazione dopo una parte del lay-up durante la parte di consolidamento. Meccanicamente la produzione di polveri con particelle di dimensioni molto piccole rappresenta un costo aggiuntivo che può essere più grande rispetto al costo del progetto del polimero in fibre. Tuttavia, il costo netto del mescolamento del polimero e delle fibre può essere inferiore all'impregnazione con il solvente [29]. Per alcuni polimeri, una strategia alternativa coinvolge le precipitazioni dei reagenti, ma le dimensioni tendono ad essere un po' più grandi che per le polveri formate meccanicamente.

Processo

Lay-up di pannelli compositi termoplastici e di parti è concettualmente simile al lay-up con compositi termoindurenti in strati che vengono tagliati e applicati strato dopo strato. Al di là di questa somiglianza, tuttavia, i processi sono molto diversi. La differenza è dovuta alla mancanza di adesività nella maggior parte dei termoplastici preimpregnati.

Per le parti di contorno che hanno determinate dimensioni, il primo strato può essere tenuto dallo strumento con del nastro agli angoli o con altri metodi adeguati. Poi, ogni strato deve essere attaccato mediante calore a quello sotto. Il processo di incollaggio mediante calore è analogo ad un processo di saldatura. Un ferro saldato standard con una punta a forma smussata viene applicato con una leggera pressione, dopo aver riscaldato la punta fino ad una temperatura che è ben al di sopra del Tg della resina. Per alcuni termoplastici la punta può essere riscaldata fino a 500 ° C. Questo provoca la fusione locale e la fusione della resina per lo strato successivo.

I processi di inserimento della fibra possono essere utilizzati per creare una parte utilizzando uno *slit tape* o un *tow prepreg*. L'intera superficie dello *slit tape* o del *tow* viene riscaldata in quanto questa viene stesa e fusa allo strato sottostante. Se la parte è un corpo di rivoluzione, allora il processo è simile al filament winding. Se la parte è quasi planare, si deve fare particolare attenzione nella progettazione del pezzo, degli utensili, ed è necessario un processo. Se il laminato viene costituito, con forze non in piano sufficienti a provocare deformazioni o a piegare lo strumento, si può avere una non simmetria dei ply, e si potrebbe avere la microrottura della matrice. In tal caso, può essere

necessario creare una parte che non è ottimale da un punto di vista strutturale, ma che si avvicina alla simmetria durante il lay-up dello spessore totale del laminato.

Il processo di collocamento della fibra può fornire un adeguato consolidamento in situ, ma per gli altri metodi di lay-up, generalmente sarà necessario consolidare i laminati dopo che il lay-up è completo. Se la parte è piatta o quasi, il consolidamento può verificarsi in uno stampo o in autoclave. Il consolidamento in pressa è un Po più facile, ma in molte aziende di produzione, le dimensioni della pressa sono più piccole rispetto alle dimensioni dell'autoclave.

Formatura. Un prodotto di forma comune di tessuto rinforzato viene consolidato a forma di foglio, analogamente al compensato tranne per il fatto che può essere termoformato mentre il compensato no. Da questi fogli, vengono tagliati i modelli che sono poi successivamente formati in modo tale da andare a creare la parte voluta.

Molti processi vengono utilizzati per creare le forme delle parti con fogli di materiale consolidati. In genere, questi processi sono analoghi a quelli della formazione dei fogli di metallo, dei disegni, e le operazioni di piegatura. Tali processi comprendono la formazione con rullo, forgiatura o formatura con matrice, e la formazione con diaframma.

L'assemblaggio di parti o elementi di un componente può essere realizzato senza la necessità di fori e senza la necessità di installare fissaggi rapidi. Sebbene si possono utilizzare anche tali assemblaggi convenzionali, è la capacità unica dei termoplastici di sottoporsi a rifusione post formatura e fusione che li rende particolarmente attraenti.

La fusione permette l'incollaggio strutturale di componenti da assemblare senza l'uso di sistemi di fissaggio meccanico. Tutti i componenti che devono essere saldati possono essere riscaldati e fusi assieme. Questo può essere realizzato applicando esternamente dei metodi di riscaldamento, come degli schermi a resistenza che riscaldano o dei fili piazzati all'interfaccia per il riscaldamento, o per riscaldamento a induzione che coinvolgono le fibre di rinforzo. Tutti questi metodi possono produrre eccellente aderenza. Tuttavia, se tutti i dettagli della parte sono portati a fusione, è necessario utilizzare utensili speciali per evitare distorsioni dimensionali. Se la resina è in stato semicristallino, sarà richiesta una temperatura più elevata per la fusione dell'incollaggio, al contrario se la resina è in stato amorfo.

Un simile ma diverso approccio, è quello di porre un film termoplastico con basso punto di fusione fra le superfici di contatto, come per esempio un film di PEI tra due parti con matrice in PEEK [30]. Tutti gli elementi o le parti possono essere riscaldate insieme con una pressione di contatto applicata sulle aree di contorno, e con utensili richiesti meno rigorosi.

Polieterimide e PEEK sono univocamente miscibili, aiutando a costruire un'interfaccia molto forte.

Effetti della temperatura di processo. Per molti termoplastici, le proprietà ad alta temperatura e la resistenza ai fluidi ambientali risultano dal raggiungimento dello stato semicristallino. Una volta che il semicristallino è stato raggiunto, le regioni del materiale presentano un più alto punto di fusione rispetto alle adiacenti, materiale in stato amorfo. In aggiunta, è stato riscontrato che la cristallinità e la morfologia cristallina influenza la tenacità della frattura carbonio / PEEK [31].

Il diametro della fibra può influire sulla morfologia del PEEK. Il più piccolo, $5\ \mu m$ delle fibre IM6 presentano una migliore resistenza a frattura rispetto al più ampio $7\ \mu m$ delle fibre AS4. Tuttavia, le differenze nel consumo totale di energia nelle curve tensione-deformazione può causare gran parte di questo [32]. Le fibre IM7 sono simili in diametro e proprietà alle fibre IM6, quindi si possono avere effetti simili.

Alcune influenze sulla misura di cristallinità vengono realizzate mediante il controllo del tasso di raffreddamento durante la fase di fusione. Il polietere eterchetone ha come caratteristica limite di circa il 30% per la conversione allo stato semicristallino.

Il raffreddamento più veloce è in grado di ridurre l'estensione della cristallinità. Mentre un aumento del livello di cristallinità migliora la resistenza del solvente, ma crea anche un materiale più fragile. Una lenta velocità di raffreddamento di $1\ ^\circ C / min$ risultata in un 40% di riduzione della tenacità a frattura del AS4/PEEK rispetto al raffreddamento rapido a $50\ ^\circ C / min$ [32]. Per la maggior parte delle parti questa è una buona notizia per il trattamento a causa di un raffreddamento più veloce che diminuisce il tempo di ciclo. Tuttavia, questo suggerisce anche che uno spessore molto sottile per un laminato PEEK potrebbe avere proprietà che variano attraverso lo spessore.

Le temperature di processo, così come i tassi di raffreddamento, hanno una notevole influenza sulla morfologia finale e sulle proprietà risultanti. Nei compositi termoplastici in carbonio poliammide, il trattamento a temperature superiori alla T_g causa la riduzione o addirittura la perdita irreversibile di cristallizzabilità [33]. Questo stesso tipo di comportamento è stato anche riportato per carbonio / PEEK [34].

Da queste informazioni, è chiaro che i parametri di processo, le dimensioni della fibra, e, eventualmente le caratteristiche della superficie in fibra interagiscono nella creazione di cristallinità. Insieme, questi risultati suggeriscono che vi sia ancora molto da determinare circa i rinforzi, i processi e le proprietà di interrelazione nei compositi termoplastici.

Costi

Molto è stato detto circa i benefici sui costi di produzione delle parti in composito termoplastico; tuttavia, una considerazione più importante è il diritto di corrispondenza e materiale per il processo di applicazione. I termoplastici, se non adeguatamente mirati e fabbricati, possono essere molto più costosi di quelli termoindurenti. Tuttavia, se correttamente mirati e fabbricati, i termoplastici sono in grado di offrire vantaggi in termini di costi.

Un esempio è la non necessità di avere magazzini refrigerati e di non avere limitazioni fuori della vita. Anche se queste sono vere e proprie prestazioni, che offrono risparmi banali sui costi rispetto alle spese di fabbricazione dei termoindurenti costruiti in modo efficiente in azienda. I risparmi dovuti all'eliminazione di magazzini refrigerati possono essere facilmente e rapidamente sopraffatti da perdite significative in altri settori.

Uno di questi settori di potenziale responsabilità è il lay-up. Durante tutta la storia dei materiali compositi, il più grande e ricorrente contributo sul costo del lavoro è stato mettere il materiale composito nello stampo della parte che si vuole costruire. Fondamentalmente, dal 40% al 60% del costo

totale del prodotto finito è coinvolto in questa parte di fabbricazione. Il lay-up strato dopo strato su uno strumento di contorno è un processo che richiede del tempo. Questo è vero quando si utilizzano materiali termoindurenti che hanno una qualità ideale di adesività. Quando si utilizza materiale termoplastico che non ha adesività, il riscaldamento per ottenere tale adesività può raddoppiare o triplicare il tempo del lay-up.

I costi del lay-up possono essere trasformati da peso in vantaggio per il lay-up e il consolidamento dei laminati piatti, seguita da una termoformatura della parte nella forma desiderata. Il lay-up di laminati piani è semplice e non richiede il calore per ottenere l'adesività strato per strato. Per le piccole parti, il laminato può essere grande abbastanza per fare in modo che più copie del modello richiesto possano essere tagliate da questo dopo il consolidamento. Per un livello significativo, il lavoro per il lay-up del materiale per una parte fornisce il lay-up per altre parti. Attuali metodi e strategie, tuttavia, tendono a limitare l'uso di tali approcci che utilizzano laminati di spessore costante. Senza parte interna ply-drops, il beneficio inerente dalla personalizzazione dei compositi viene perso. Inoltre, la forma della parte, insieme con l'allungamento che potrebbe verificarsi perpendicolarmente alle fibre, devono essere geometricamente compatibili con una base di partenza che è piatta. Un allungamento sensibile parallelo alle fibre non si verifica.

Un'altra strategia per la diminuzione dei costi del lay-up è quello di prendere nastri controllati mediante computer o macchine di posizionamento dei *tow*. Un dispositivo di riscaldamento collocato nel *roll nip*, il luogo in cui lo *slit tape* o il *tow* incontra la superficie della parte in fase di costruzione, provocando lo scioglimento dei termoplastici ad un livello sufficiente per raggiungere l'adesività e la compattazione in situ.

Si può presumere che i termoplastici beneficeranno di metodi automatici di collocamento, come i materiali termoindurenti. Un certo numero di studi ha dimostrato che i costi totali di produzione possono essere ridotti dal 20% al 35% mediante l'uso di macchine automatizzate per il collocamento. Con i termoplastici, però, il risparmio totale del lay-up con nastro caldo sarà più grande che con i termoindurenti, perché si verifica durante la compattazione del lay-up, e non è necessaria una cura in autoclave.

Generalmente, i volumi di produzione deve essere sostanziosi in modo da ammortizzare efficacemente il costo delle attrezzature per il posizionamento automatico. Il costo di tali apparecchiature può variare da circa 1,5 milioni a 5 milioni di euro, a seconda delle dimensioni delle apparecchiature necessarie e della raffinatezza necessaria per il controllo di processo. La maggior parte delle macchine attualmente è più vicina come prezzo alla fascia alta del costo.

L'elaborazione di parti in autoclave è un altro modo per spendere più denaro di quanto sarebbe necessario per compositi termoindurenti. L'elevata temperatura di rammollimento e di fusione di compositi termoplastici strutturali termoplastici, e le pressioni più alte necessarie per il consolidamento e per la compattazione richiedono un'autoclave più costosa e un processo più complicato. Le scelte di materiali per il *vacuum-bagging* sono limitate a prodotti più costosi, e l'affidabilità del sistema di chiusura e la sua sopravvivenza è fortemente contestata.

Di conseguenza, se si mette un elemento o una struttura in autoclave che si unirà a un altro ele-

mento o struttura attraverso un fissaggio meccanico, non è più probabile che vi sia uno svantaggio di costo utilizzando termoplastici. In tal caso, si vorrebbe giustificare la scelta dei materiali, sulla base di alcune proprietà uniche o benefici strutturali.

I termoindurenti hanno fatto passi da gigante, dalla prima comparsa dei termoplastici, e riescono ad offrire la maggior parte dei benefici disponibili dai termoplastici.

Se, tuttavia, l'elemento o la struttura sarà unito a un'altra struttura termoplastica attraverso la fusione dei bordi, quindi la responsabilità di aver fatto l'elemento o la struttura in autoclave sarà negata. In questo caso, il polimero negli elementi o nelle strutture si scioglie e si unisce insieme nello stesso modo in cui gli strati in un laminato si fondono e si legano insieme. L'assemblaggio di elementi strutturali con fissaggio meccanico in termini di tempo è costoso. Di solito è più costoso del lay-up della parte. La fusione di incollaggio, in confronto, è un vero costo effettivo e può consentire una notevole riduzione del costo totale del componente.

In realtà, la possibilità di assemblare tutti i componenti strutturali, sia attraverso il trattamento in autoclave o mediante qualche altro approccio del settore manifatturiero, è estremamente significativo [35]. In Europa, Dassault Aviation, Eurocopter, e Aérospatiale stanno utilizzando attivamente materiali termoplastici per la fabbricazione della struttura della fusoliera struttura [36]. Questo sviluppo implica il collocamento automatico delle fibre del nastro di PEEK, insieme al processo di fusione della pelle e dei dettagli della sottostruttura. Un approccio di questo tipo può produrre vantaggi a livello di costi estremamente interessanti e resistenza agli urti.

Naturalmente, la comunità dei termoindurenti sta premendo sui vantaggi strutturali dell'assemblaggio. E ora è fattibile, e pratico, al fine di raggiungere con i termoindurenti ogni tipo di assemblaggio che può essere raggiunto con i termoplastici.

Con cura nell'approccio della progettazione, il risultato può essere ancora più basso in termini di costo rispetto ai termoplastici.

Panoramica sui polimeri

I compositi rinforzati a fibra lunga vengono utilizzati solo dove sono richieste elevate performance. I polimeri considerati adeguati per le matrici dei compositi avanzati includono:

1. Polieteramide PEI
2. Polifenilensolfuro PPS
3. Polietere eterchetone PEEK
4. Polietere chetone chetone PEKK

Morfologia del polimero

La morfologia del polimero causa differenze importanti nelle proprietà fisiche e chimiche dei polimeri. I polimeri amorfi sono tipicamente più tenaci, hanno un'ampia finestra di processo, e una temperatura

di processo più bassa relativa alla loro temperatura di transizione vetrosa (T_g). I polimeri semicristallini hanno tipicamente un modulo più alto, migliore resistenza all'ambiente, e possono essere utilizzati al di sopra della T_g . Il livello di cristallinità nei polimeri semicristallini varia in base al polimero, alle condizioni di processo e al peso molecolare.

Proprietà termiche

Le proprietà termiche dei polimeri sono elencate in Tabella 1.25 e confrontate in figura 1.34. Si vede immediatamente l'effetto della morfologia nelle proprietà termiche. La T_g del PEI è 120°C più alta di quella del PPS, anche se hanno temperature di processo simili. Si nota inoltre l'effetto della morfologia del polimero nel confronto della T_g con la temperatura d'uso continuo, misurata con il metodo del Laboratorio Underwrites. La temperatura d'uso continuo del PEI è inferiore a quella del PPS, nonostante la T_g del PEI è significativamente più alta. Questo indica che i polimeri semicristallini possono mantenere performance meccaniche significative a temperature superiori della T_g . Il PEKK, essendo un polimero semicristallino, ha una temperatura di processo abbastanza bassa confrontata con la sua T_g e la sua temperatura d'uso.

Property	Units	PEI	PPS	PEEK	PEKK
Source of Data	Ref	7	8	9	10
Polymer Morphology		Amorphous	Semi-Crystalline	Semi-Crystalline	Semi-Crystalline
Thermal Properties					
Glass Transition Temp. (T_g)	°C	218	95	145	156
Melt Temperature (T_m)	°C	N/A	280	343	308
Process Temperature	°C	330	325	390	340
UL Continuous Use Temp.	°C	170	190	260	250
Thermal Stability at Process Temperature		Excellent	Moderate	Excellent	Excellent
Physical and Mechanical Properties					
Density	g/cm ³	1.27	1.35	1.32	1.30
Tensile Strength	MPa	105	90	100	90
Tensile Modulus	GPa	3.0	3.8	3.5	3.4
Tensile Ultimate Elongation	%	60	3	60	80
Notched Izod Impact Strength	J/m	53	16	60	48
Environmental Resistance					
Comments		Sensitivity to aromatic hydrocarbons, chlorinated solvents, ketones and esters	Outstanding	Excellent	Excellent
Flame, Smoke & Toxicity					
Comments		Excellent	Some sulphide emissions on combustion	Excellent	Excellent
Polymer Cost					
Relative Comparison		\$	\$	\$\$\$	\$\$

Tabella 1.25: Proprietà dei polimeri ad elevate prestazioni per l'uso come matrici di compositi

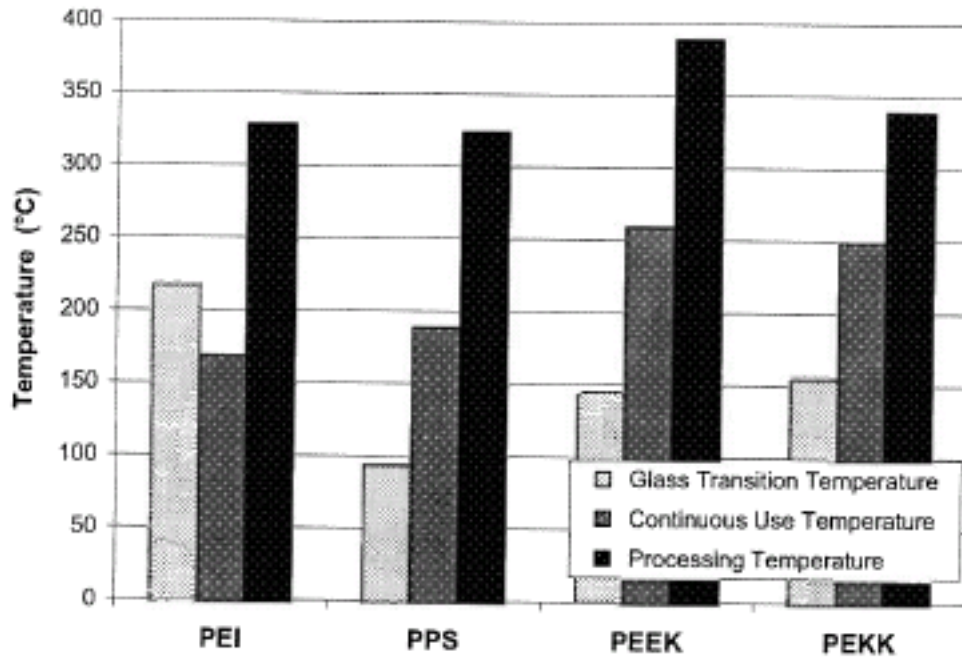


Figura 1.34: Confronto delle proprietà termiche dei Polimeri

Uno dei vantaggi dei polimeri termoplastici è che possono essere lavorati più volte. Per esempio il polimero può essere fuso durante la fabbricazione di un composito, di nuovo durante la fabbricazione del laminato, e un'altra volta ancora durante la formazione del laminato, e alla fine durante le operazioni di saldatura per l'assemblaggio del composito. Pertanto i polimeri devono avere sufficiente stabilità termica alle temperature di processo per cicli di processo multipli. I quattro polimeri considerati hanno tutti una buona stabilità termica, eccetto il PPS, il quale mostra delle variazioni della viscosità e delle proprietà meccaniche e termiche in funzione delle condizioni di processo [37].

Proprietà Meccaniche Il modulo del polimero contribuisce alle capacità portanti del composito, e quindi si desidera avere un alto modulo del polimero. Un confronto dei moduli viene mostrato in Figura 1.35. Il PEI ha il modulo più basso mentre il PPS il più alto, in parte dovuto alla loro morfologia.

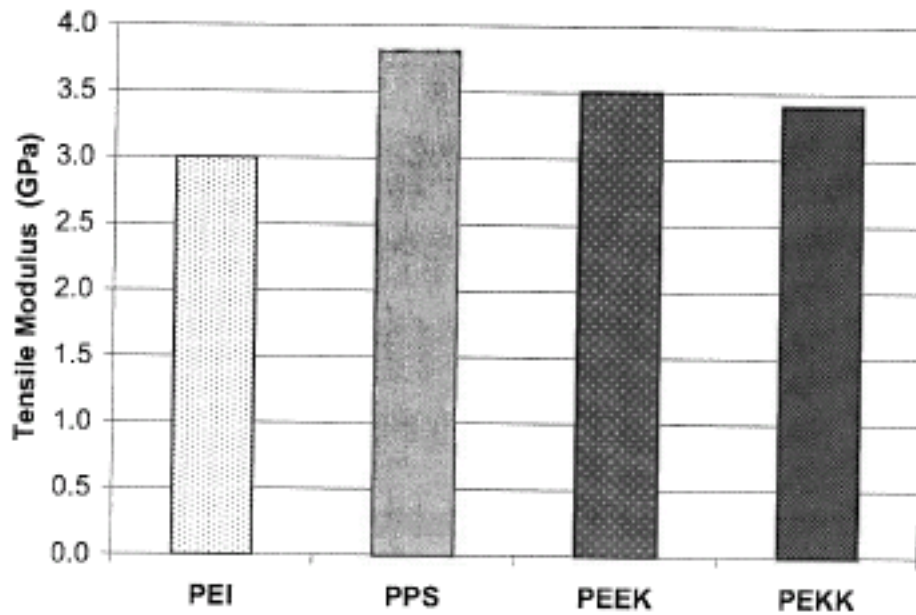


Figura 1.35: Confronto del modulo dei polimeri

La resistenza a trazione di tutti i polimeri è simile, ma sono presenti delle differenze significative nell'allungamento a rottura come mostrato in Figura 1.36. I polimeri termoplastici generalmente hanno un alta tenacità e questo si può vedere nella duttilità post-snervamento nelle prove a trazione. Questo snervamento non dovrà necessariamente essere raggiunto nelle applicazioni di compositi, ma è indicativo delle differenze di tenacità dei polimeri. Ci sono grandi differenze fra il PPS e gli altri tre polimeri. Il PPS non deve completare uno snervamento duttile prima di arrivare a frattura, mentre PEI, PEEK e PEKK hanno tutti e tre un'elevata duttilità dopo lo snervamento.

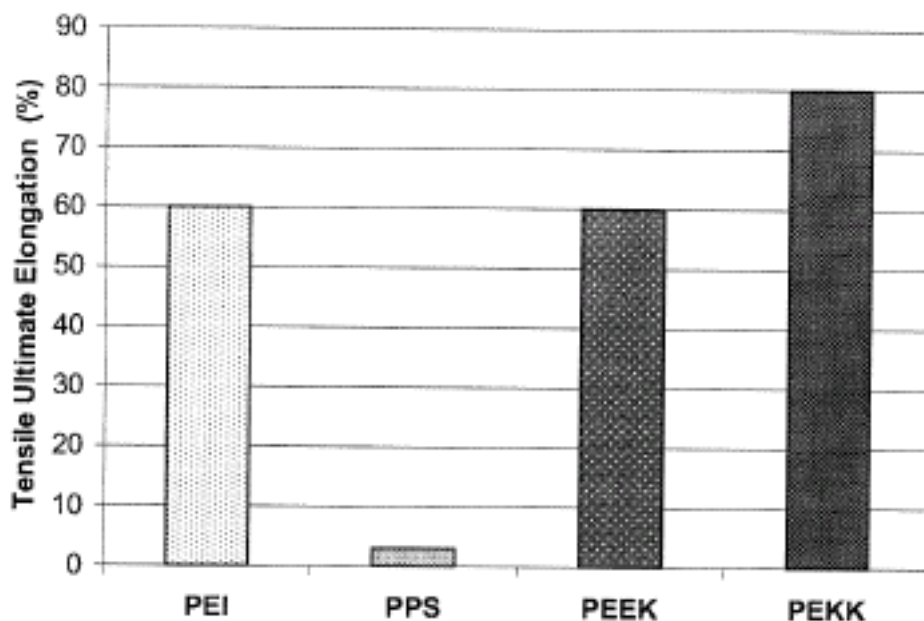


Figura 1.36: Confronto dell'allungamento a rottura dei polimeri

La tenacità viene misurata direttamente in un test di impatto come mostrato in Figura 1.37. Un'al-

tra volta si vede una notevole differenza nell'assorbimento di energia fra il PPS e gli altri tre polimeri. Si nota che l'allungamento a rottura e la tenacità a impatto del PEEK e del PEKK sono confrontabili con il PEI malgrado le differenti morfologie.

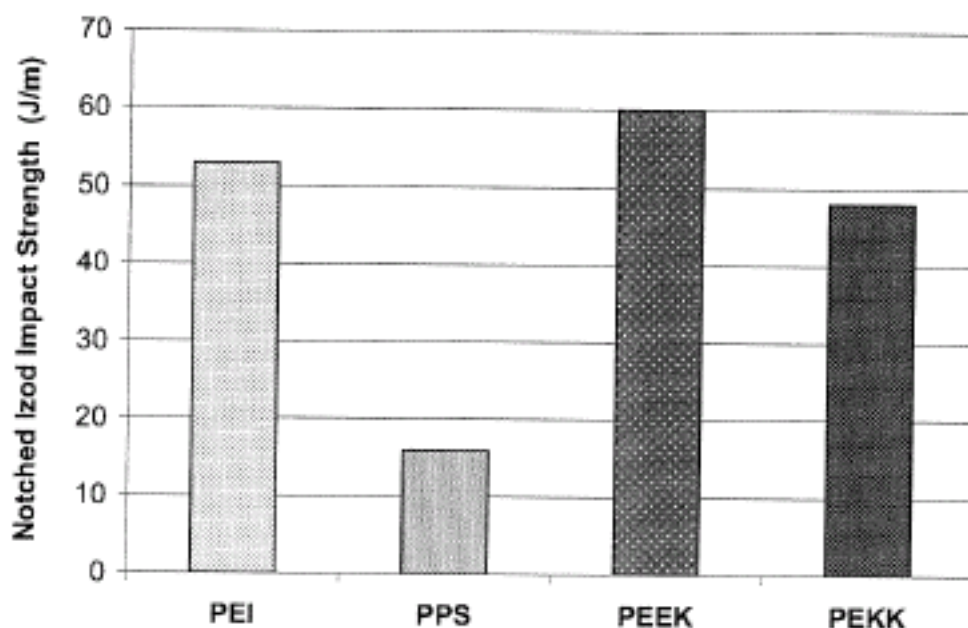


Figura 1.37: Confronto della resistenza all'impatto Izod notched dei polimeri

Resistenza all'ambiente

Il PEI ha una buona resistenza all'ambiente per essere un polimero amorfo ed è adatto per molte applicazioni. Dov'è necessaria un'elevata resistenza all'ambiente, per esempio in applicazioni strutturali di un aereo, in componenti *down-hole*, etc., si richiede un polimero semicristallino. PEEK e PEKK hanno un'eccellente resistenza all'ambiente, e il PPS ha un'eccezionale resistenza ad una vasta gamma di ambienti corrosivi.

Fiamma, Fumo e Tossicità (FST)

Tutti i polimeri considerati hanno buone proprietà FST. L'emissione di gas tossici da parte del PPS includerà composti dello zolfo dovuti alla decomposizione dei prodotti polimerici.

Costi

I costi del polimero sono confrontati in tabella 1.25. Il PEI e il PPS vengono prodotti in volumi grandi per un'ampia gamma di applicazioni e conseguentemente le economie di scala sono completamente realizzate. Il PEEK e il PEKK vengono costruiti in quantità relativamente basse e c'è spazio per future riduzioni di costo, quando la produzione dei polimeri e l'espansione in ulteriori applicazioni saranno mature.

Applicazioni

I lavori per applicare compositi termoplastici in aeromobili commerciali sono stati avviati fin dai primi anni 1990. Un'applicazione anticipata è stata il carrello principale dell'aeromobile Fokker 50 [38,39]. La certificazione di questa struttura è stata completata nel marzo 1998.

I compositi termoplastici stanno guadagnando il riconoscimento per la loro durezza e per gli attributi che possono consentire un risparmio dei costi ricorrenti. Una vasta gamma di applicazioni è stata eseguita e queste vanno dalle strutture del terziario, a quelle del secondario e a quelle del primario che hanno richiesto la certificazione del Federal Aviation Administration (FAA). Un esempio di struttura primaria sono i pannelli del piano in pressione dell'aereo Gulfstream V, che ha ricevuto la certificazione nel Dicembre 1996 [40].

Ad oggi, le applicazioni di compositi termoplastici hanno spaziato da piccoli, semplici, particolari costruttivi, come le costole a strutture assemblate relativamente grandi.

Questo elenco è destinato a fornire una guida sui potenziali usi e non è comprensivo di tutte le attuali applicazioni dei termoplastici. In questo elenco risulta che la più bassa temperatura di processo, il materiale più a basso costo, e il carattere amorfo del PEI favorisce la fabbricazione di parti più del semicristallino PPS o del PEEK ad alta temperatura.

La figura 1.38 illustra l'ala fissa del Airbus A340-500/600. Questo è una delle strutture termoplastiche costruita per esterni di aerei. Si tratta di un risparmio sui costi che rappresenta l'assemblaggio strutturale consentito dalle caratteristiche di fusione fondere dei materiali termoplastici. Il guscio esterno e le costole di irrigidimento sono fusi insieme senza l'uso di sistemi di fissaggio meccanico.

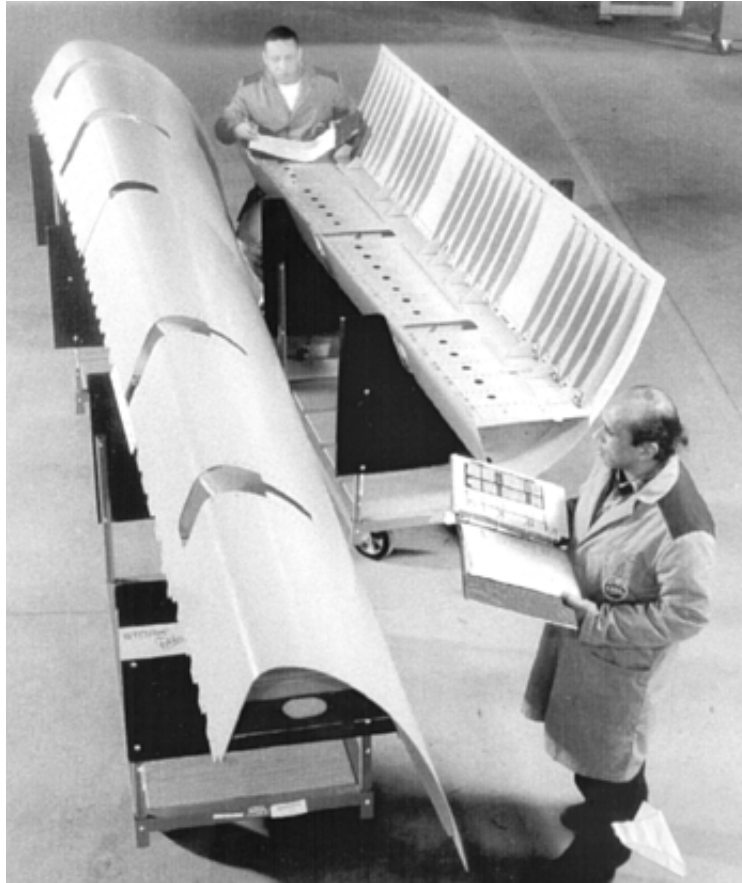


Figura 1.38: Assemblaggio del A340-500/600, ala fissa, della Fokker Aerostructures

I termoplastici possono mantenere eccellenti proprietà dielettriche durante il servizio a causa del loro basso assorbimento di umidità. Questa stabilità ha portato recentemente alla domanda di PEKK rinforzato con tessuto 7781 style per cupola di ricetrasmissione [41,42,43].

Capitolo 2

Tecnologie

2.1 Manual Prepreg + Autoclave

[1]

2.1.1 Introduzione processi a stampo aperto

Lo stampaggio aperto, noto anche come stampaggio per contatto, laminazione aperta e wet lay-up, è stato il primo metodo usato nell'industria dei compositi a matrice polimerica per la realizzazione di compositi termoindurenti, ed è ancora oggi la tecnologia scelta per un'ampia gamma di prodotti. Rappresenta una tecnologia di base, che fa propri tutti i vantaggi della realizzazione di materiali compositi usando tecnologie, processi e materiali relativamente semplici.

I processi a stampo aperto consistono nel deposito del rinforzo e della resina liquida o di materiali preimpregnati sulla superficie dello stampo (che può o meno essere prerivestito di gel coat), o nel deposito su altri substrati, ad esempio nella realizzazione di strutture sandwich, che saranno integrati nel pezzo finale.

I processi a stampo aperto sono tipicamente usati per piccole medie serie (fino ad un massimo di 200 – 300 pezzi/anno), offrendo però notevoli vantaggi sia di processo che di prodotto. E' ad esempio possibile produrre sia pezzi di grandi dimensioni dalla geometria complessa, sia piccoli e semplici componenti.

La versione hand lay-up consiste nell'applicazione manuale di rinforzo secco e resina, mentre la versione spray-up utilizza un'attrezzatura spray per depositare entrambi sullo stampo o su substrati alternativi.

Il processo hand lay-up necessita di piccoli investimenti e di una non eccessiva conoscenza rigorosa della tecnologia di processo, in quanto la corretta realizzazione del pezzo è nelle mani dell'esperienza dell'operatore e la ripetitibilità è molto bassa, mentre il processo spray-up necessita degli investimenti per l'attrezzatura spray. Per entrambi il trattamento di cura avviene in ambiente atmosferico.

Il processo manual prepreg lay-up consiste invece nella deposizione manuale sullo stampo di

tessuti o nastri preimpregnati che vengono compattati per mezzo di sacco a vuoto e curati in forno o in autoclave.

La tecnologia di automated tape laying rappresenta l'evoluzione automatizzata del manual prepreg lay-up per quanto riguarda la fase di deposizione di nastri di rinforzo.

La tecnologia del Prepreg + Pressa rappresenta l'evoluzione per quanto riguarda la fase di cura che non avviene più in autoclave ma direttamente in stampo che ora diventa chiuso.

La qualità superficiale dello stampo è di fondamentale importanza quando sono richieste rese estetiche di qualità. Stampi e utensili per l'industria dello stampo aperto sono spesso realizzati in materiale composito e per l'ottenimento di buone finiture superficiali vengono utilizzati stampi appositi e particolari gel da utensile che realizzano una patina protettiva sulla superficie del pezzo finito.

I processi a stampo aperto offrono alcuni vantaggi rispetto ad altre tecnologie più complesse e capaci di ratei produttivi medio alti, e sono utilizzati per numerose applicazioni specializzate. I vantaggi sono:

- Libertà di progettazione
- Facile modifica del progetto
- Bassi costi di stampo e attrezzaggio
- Bassi costi di start-up
- Considerati processi semplici
- Grande flessibilità di condizioni operative
- Possibilità di realizzare grandi pezzi dalle buone caratteristiche meccaniche
- Possibilità di produzione on-site

Svantaggi associati ai processi a stampo aperto:

- Ratei produttivi medio-bassi
- Tempi di ciclo elevati
- Manodopera necessaria elevata
- Evaporazione, esposizione, emissione di composti volatili organici (VOCs)
- Non sono processi "puliti"
- Resa estetica solo su una delle due superfici
- Dipendenza dalle abilità dell'operatore
- Limitazione nella realizzazione di spigoli acuti e bordi

- Lungo tempo di post-stampaggio e riattrezzaggio
- Limitata possibilità di utilizzare riempitivi per modificare le proprietà

Le proprietà del laminato dipendono dalla qualità della resina e dal tipo di rinforzo, ma un grande vantaggio dei processi a stampo aperto è la grande flessibilità nell'ottimizzare le proprietà del composito a matrice termoindurente. Si può osservare in Fig. 2.1 La dipendenza delle caratteristiche meccaniche dalla quantità (frazione di fibre) e tipo (direzione) di rinforzo usato.

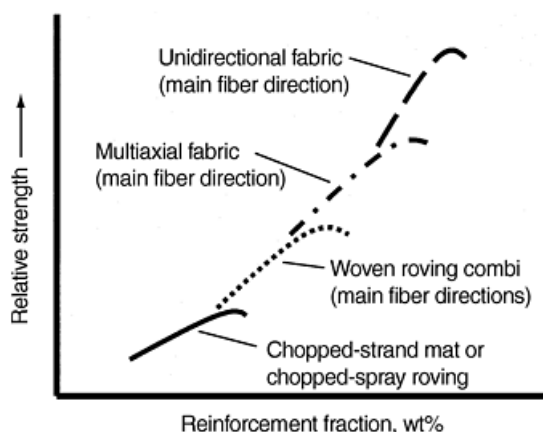


Figura 2.1: Caratteristiche meccaniche dipendenti dalla frazione di fibra e dal tipo di rinforzo usato

Si può osservare come l'andamento delle curve presenti un massimo in corrispondenza della frazione di fibre massima oltre la quale il laminato risulta troppo secco in quanto non vi è sufficiente resina presente per bagnare e/o impregnare tutte le fibre durante il processo di consolidazione manuale (processo di omogenizzazione). A questo corrisponde un crollo delle proprietà meccaniche.

2.1.2 Caratteristiche tecniche ed applicazioni

Forme di prepreg:

Le due forme più comuni di prepreg sono nastri unidirezionali e strutture tessute. Per ogni forma sono richieste diverse tecniche di lay-up. Per ragioni economiche di costruzione, i prepregs in materiale tessuto vengono usati ovunque è possibile nonostante la minore durezza e resistenza alla trazione. La minore durezza e resistenza derivano dal pieghettamento dei tow a seconda del modo in cui i fili della trama incrociano quelli dell'ordito. Questo piega i fili durante la fabbricazione del tessuto e il processo non può restituire la loro struttura rettilinea. Inoltre, ad ogni incrocio di filo, viene creato uno spazio libero da fibre che viene riempito di resina; per questo la frazione in volume delle fibre varia dal 50% per strutture pesanti a 58% per strutture molto vicine a quelle unidirezionali tessute che hanno dal 90% al 98% di fibre nella direzione della trama. Per prepreg unidirezionali con lay-up multi

direzionale, la frazione di fibre in volume varia dal 58 al 63%. Di conseguenza, laminati di prepreg tessuti sono sia meno duri e resistenti e sono più pesanti con un più alto contenuto in resina dei laminati a tessuto unidirezionale. Laminati tessuti sono più resistenti al danneggiamento dei laminati unidirezionali dato che gli ultimi hanno una bassa resistenza al cedimento da delaminazione prodotto durante e dopo l'impatto.

Le caratteristiche di lay-up riferite a prepregs tessuti sono:

- Strati più spessi (perciò in numero minore) e tempi di lay-up più brevi.
- Adattabilità alle curvature molto maggiore e perciò minore suscettibilità al pieghettamento.
- Maggior larghezza del materiale di 1.25 o 1.7 m paragonato a 0.3 o 0.6 m per i prepregs tessuti. (Il prepreg a nastro è stretto poichè ha una bassa adattabilità alle curvature e la quantità dei materiali di scarto è rilevante per nastri di grandi dimensioni.).
- Le velocità di esecuzione del lay-up è approssimativamente da 3 a 5 volte maggiore di quella per tape unidirezionali.
- Nessuna esigenza di fare combaciare i bordi delle strisce dato che i tessuti sono più ampi delle parti.
- E' richiesta una meno precisa orientazione dei ply dato che il lay-up è meno ottimizzato; perciò il lay-up può essere più veloce.

Svantaggi nella produzione dei prepreg tessuti:

- Più alta proporzione di scarto per il più ampio materiale.
- Costi più alti del tessuto prepreg a basso spessore dato che il processo di tessitura precedente la preparazione del prepreg costituisce un costo aggiuntivo. Prepreg tessuti più spessi con un peso areale in fibre (FAW) di 370 g/m² sono diventati uno standard dato che il costo di tessitura è circa la metà di quello del convenzionale tessuto da 285 g/m². Questi prepregs spessi conferiscono ridotta durezza ai componenti risultanti.

Come risultato del rapporto costo/beneficio nella produzione di prepregs tessuti, essi vengono usati in prevalenza per lay-up manuali, escludendo molte applicazioni leggere di nicchia. Tapes unidirezionali da lay-up si adattano meglio ad automated tape layers che possono rapidamente tagliare e depositare materiale, e che provvedono a che il lay-up sia sufficientemente piatto. Recentemente nastri prepreg unidirezionali più spessi sono stati qualificati per uso aeronautico così da aumentare l'entità della laminazione di strutture spesse. Comunque, la risultante restrizione nel taglio di spessore impedisce l'uso di prepreg spessi in molte strutture.

Le altre caratteristiche del lay-up sono la viscosità delle resina e la conformità di stile del tessuto. Entrambi questi elementi determinano la difficoltà di manipolazione del prepreg nell'interno dei recessi dello stampo. Per parti con complessità di forma, una resina altamente drappeggiabile,

altamente viscosa è preferibile per produrre un lay-up pienamente consolidato. Per parti piatte o con singola curvatura, un tessuto meno drappeggiabile come un tessuto piano con una resina a bassa viscosità (duro) si adatta meglio.

Si può inoltre accennare all'esistenza di prepreg di tipo parzialmente impregnato (PIPS Partially Impregnated Prepreg System) che garantiscono una serie di vantaggi notevoli:

- Semplice processo di compattazione in sacco a vuoto
- Velocizzazione del lay-up grazie alla possibilità di costruzioni con ply multipli o mixed.
- L'impregnazione parziale aumenta la drappabilità del tessuto e la maneggiabilità del materiale.
- La non completa impregnazione fa sì che siano presenti intrinseche vie di fuga che migliorano la rimozione di aria e la riduzione del contenuto di vuoto

Tolleranza di disposizione:

Dato che il lay-up manuale è una professione di destrezza nell'usare materiali molli, la tolleranza di disposizione non può esser definita in modo molto stretto. La tolleranza accettabile differisce per materiali tessuti e nastri. Per i nastri, che sono molto più duri e sono applicati in strisce che tipicamente sono tra i 150 e i 600 mm una tolleranza posizionale di ± 1 mm e una tolleranza di linearità di $\pm 2^\circ$ può realisticamente essere raggiunta. Per prepregs tessuti, tolleranze di ± 2 mm per posizione e di $\pm 3^\circ$ per linearità sono realisticamente raggiungibili.

Descrizione tecnica

Il ciclo di lavorazione completo che viene generalmente adoperato in riferimento al caso di cura in autoclave può essere schematizzato nella seguente successione di fasi produttive.

1. Acquisizione preimpregnato in contenitore
2. Conservazione preimpregnato a bassa temperatura
3. Permanenza a temperatura ambiente
4. Apertura contenitore, ed estrazione a srotolamento pre-impregnato
5. Taglio e profilatura del preimpregnato
6. Disposizione nello stampo e laminazione

(a) Operazioni preliminari:

- i. Pulitura delle superfici di lavorazione dello stampo
- ii. applicazione sostanze separatrici sulle superfici interne dello stampo (gelcoat)
- iii. Curing dei prodotti separatori con stampo riscaldato in forno

7. Rivestimento con strato uniforme di materiale assorbente
8. Rivestimento con sacco a vuoto
9. Sigillatura dei contorni del sacco
10. Aspirazione dell'aria e ciclo di polimerizzazione in autoclave
11. Rimozione del sacco
12. Rimozione pezzo dallo stampo
13. Rifilatura e rifinitura pezzo
14. Montaggio

Il processo di lay-up attraverso l'insaccamento per il curing della resina comprende le seguenti cinque fasi: definizione del lay-up, taglio del kit dei plies, debulking e preparazione per il curing.

Definizione del lay-up:

Il lay-up di un componente viene definito da:

- Forma complessiva prodotta dalle curvature del tool di stampo
- Spessore in termini di numero di strati sulla superficie
- Spessori “drop offs” aggiuntivi se lo spessore è variabile
- Orientazione in relazione alle linee di carico.

Per la maggior parte dei componenti leggeri, le istruzioni per il lay-up verranno ricavate dall'analisi di un modello ad elementi finiti del componente. Il modello avrà il limite di carico simulato nel progetto di lay-up. Lo spessore e l'orientamento degli strati vengono poi modificati finché tutte le regioni del componente hanno dimostrato di essere sottoposte a tensioni minori della massima accettabile in ogni strato. Per strutture con forme e/o con carichi complessi, lo specifico lay-up è generalmente quasi isotropo, il che significa che c'è un numero equivalente di strati a 0° , 90° , 45° , e 135° . Ciò viene inoltre preferito perché viene rimossa ogni complicazione riguardante la simmetria di ritiro delle fibre. Un lay-up bilanciato avrà una proporzione bilanciata o simmetrica di fibre ad ogni angolazione attorno al piano centrale di simmetria. Questo è un elemento critico per materiali tessuti unidirezionali ma è anche molto importante per gli strati satinati e per i tessuti in diagonale; i tessuti piani sono immuni da uno sbilanciamento del lay-up ma hanno minore drappeggiabilità e consistenza dei tipi precedenti.

Il passo successivo consiste nel decidere la misura e la forma di ogni pezzo di prepreg. Per minimizzare il numero di prepregs, sono stati sviluppati programmi dedicati come ad es. FiberSIM (VISTAGY Inc. Waltham, MA). Questi sono usati per stabilire la forma dello stampo mentre i pezzi di prepreg stanno per essere posizionati e, utilizzando dati sulla drappabilità del materiale (possibilità

di essere tagliati per conformarsi alla doppia curvatura), per indicare se i pezzi di prepreg hanno la probabilità di pieghettarsi. Dopo una o più ripetizioni, viene definito un kit di pezzi e le loro orientazioni.

Kit di taglio dei ply:

L'obiettivo da raggiungere per l'operazione di cutting è quello di minimizzare quanto più è possibile gli scarti. Costi di acquisto e di smaltimento sono estremamente alti anche per prepregs a basso contenuto di vetro. Le rimanenze rappresentano costi nascosti estremamente alti che non possono essere giustificati nel processo produttivo.

Programmi applicativi come FiberSIM sono stati sviluppati per minimizzare i tagli di scarto del rotolo di prepreg. Il programma viene usato per combinare il complesso dei plies alla larghezza del rotolo originale e per definire la linea di taglio.

Gli utilizzatori di grandi quantità di prepreg utilizzano un dispositivo automatico che taglia il materiale e, in alcuni modelli, stampa un bar code o un numero su di esso per identificare il pezzo dai dati del CAD (computer-aided design). Macchine ad ultrasuoni che utilizzano un coltello vibrante sono in grado di lasciare non tagliata la superficie più bassa di sostegno al film, il che riduce il tempo di lay-up durante la laminazione. Manualmente i pezzi vengono accatastati in ordine per lay-up. Questi kits possono essere sigillati e depositati in freezer se un ritardo è sopravvenuto prima dell'uso.

Lay-up:

La parte difficile del processo è applicare il rinforzo (nuclei di indurimento e inserti di giunzione) così da conferire la intrinseca durezza o resistenza alla trazione delle fibre, al componente stampato. Il kit di pezzi di prepreg viene trasferito alla macchina di stampo dai laminatori che usano le loro dita ed apparecchi per distendere con forza il materiale duro e appiccaticcio verso gli angoli dello stampo di formatura (Fig. 2.2) e poi per spianarlo sopra le aree piatte o dolcemente curve.

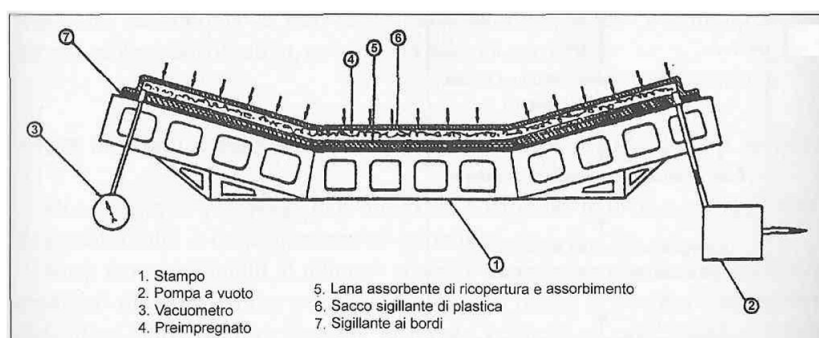


Figura 2.2: Formatura in stampo

Sul prepreg vengono quindi disposti una serie di materiali in fogli, lastre e strati, ciascuno dei quali ha una precisa funzione, e la cui disposizione può essere schematizzata come in Fig. 2.3.

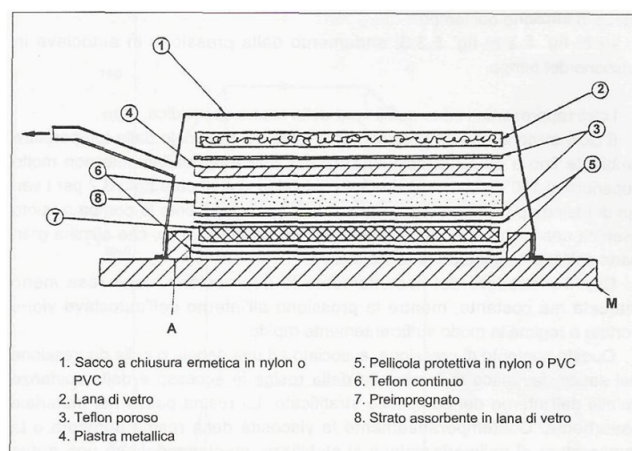


Figura 2.3: Disposizione dei materiali

Sulla base di supporto per la stratificazione M, che può essere realizzata sia in metallo, come anche preferibilmente in materiali compositi appositamente costruiti, tra gli argini di contenimento e delimitazione A opportunamente fissati, vengono disposti secondo una disposizione tipica a partire dall'alto un sacco di nylon o PVC a tenuta d'aria sigillato lungo tutto il suo bordo esterno. Uno strato di lana di vetro, un foglio di teflon poroso, una piastra metallica di assestamento e ripartizione uniforme del carico dovuto alla pressione esterna, un foglio di teflon continuo antiaderente, lo strato di materiale assorbente in lana di vetro, una pellicola protettiva di nylon o P.V.C ricoprente il preimpregnato su entrambe le facce. Particolarmente importante lo strato di materiale assorbente di lana di vetro o altro materiale poroso, che ha la funzione di assorbire l'eccesso di resina che fuoriesce dal materiale stratificato durante la sua polimerizzazione. Sui materiali così disposti è steso, come detto, lo strato esterno avvolgente o sigillante a tenuta chiamato sacco che è comunicante mediante un condotto di aspirazione con una pompa a vuoto.

Riguardo alla deposizione dei prepregs, per parti con forme complesse come ad es. le scocche delle macchine da corsa, il backing film viene tolto via progressivamente per impedire che troppo grosse estensioni della superficie dei pezzi possano aderire troppo presto. Apparecchi che soffiano aria calda vengono usati localmente per ammorbidire il prepreg così che esso possa essere conformato anche entro stretti recessi. Anche con un kit completamente pretagliato, il laminatore deve ripulire i plies con un coltello ai margini del componente poiché, per componenti a doppia curvatura, ogni strato di prepreg è unico per quel che riguarda le modalità con cui viene tagliato (Fig. 2.4 Monoposto monoscocca Lola BMS–Ferrari Formula 1, prodotta con manual lay-up di prepreg con fibre tessute di carbonio [44]). Strutture a sandwich, che includono schiuma rigida a margine assotigliato o pezzi con nuclei a nido d'ape e ogni inserto di giunzione, possono essere poste direttamente nel lay-up o poste

nel lay-up con un film adesivo senza curing ; in entrambi i casi le strutture a sandwich subiscono un trattamento doppio di curing (cocured) per il rivestimento interno e per il rivestimento esterno. Per ottenere un' accurata collocazione del nucleo e degli inserti del punto di attacco, il lay-up subisce il trattamento di curing per tre volte; una volta per la faccia esterna (tool face), una volta per legare il nucleo e gli inserti con film adesivi, e una volta per la faccia interna (bag face).



Figura 2.4: Manual lay-up di prepreg con fibre tessute di carbonio

Vengono elencate alcune caratteristiche del processo di prepreg essenziali per assicurare una accettabile qualità di modellamento:

- Il tool di stampaggio deve essere adeguatamente trattato con un agente antiaderente per impedire l' incollaggio durante il curing. Un solvente o una formulazione a base di acqua (che viene ora usata sempre più di frequente per motivi di sicurezza e di salute), viene strofinata dentro lo stampo con un panno. Un rivestimento viene applicato ad ogni modello e tre o più strati ad un nuovo o riadattato stampo.
- Il prepreg non deve essere né troppo viscoso da essere non riposizionabile (dato che pezzi a forma complessa devono essere applicati in fasi successive) né troppo secco in quanto esso non aderirà allo strumento o al lay-up. Il livello di viscosità dipende dalla formulazione stessa della resina, dal tempo di conservazione (la resina diventa col tempo più dura a temperatura ambiente) e dalla temperatura di lay-up.
- Non occorrono ponti di prepreg da un angolo all'altro cosicché durante il curing i materiali insaccati comprimono completamente il prepreg contro l' intera superficie dello stampo senza tasche d'aria o angoli colmi di resina.

- Non devono rimanere tasche d'aria intrappolate tra gli strati poiché queste possono rimanere per tutta la durata del lay-up e possono venire consolidate e generare rotture tra gli strati.
- Non possono essere introdotti né raggrinzimenti né pieghe poiché la durezza e la resistenza alla trazione del componente dipende dal fatto che le fibre siano più ordinate possibile lungo le principali linee di forza del carico. I pieghettamenti agiranno anche da elementi di stress per le concentrazioni e possono causare cedimento al di sotto del limite di tensione programmato.
- Non si può permettere nessuna contaminazione del lay-up ad opera ad es. di film di copertura, grasso, insetti e sporcizia. Qualsiasi inclusione può impedire l'incollaggio, può causare pieghettamenti o produrre gas durante il curing. E' eccezionalmente facile lasciare pezzi di sottili film di copertura di polytene tra gli strati. Essi vengono frequentemente vivacemente colorati per evitare questo inconveniente. Molte inclusioni sono rilevabili solo per mezzo di un esame distruttivo e possono essere parzialmente incollate. La presenza di una inclusione può solamente essere dimostrata attraverso un catastrofico scollamento "in service". Tali errori possono costare cari in modo particolare quando interessano strutture principali di velivoli o riguardano programmi spaziali.

Orientazione e posizionamento dei plies:

Nonostante la natura viscosa del prepreg e la complessità di molte forme di stampo, un laminatore deve mantenere l'orientazione del ply e la posizione del bordo. La criticità di ciò dipende dalla massima tensione di lavoro del componente, dall'area della struttura e dall'approccio strumentale usato. Fortunatamente esiste di solito una ovvia correlazione inversa tra la complessità della forma e la normale tensione di lavoro. Parti o aree di componenti sottoposte ad alto carico sono di solito quasi piatte o dritte. Le parti più complicate normalmente non lavorano a tensioni molto alte. L'approccio alla lavorazione è importante perché alcuni componenti critici, come ad es. rivestimenti di ali, devono combinare la posizione dei bordi dei plies (ply drops) per andare in lavorazione. Questo assicura che non ci sia nessuna nervatura ricca di resina o possibile vuoto nei bordi dei plies. Per permettere che il laminatore possa raggiungere un accettabile livello di deposizione, vengono usate due tecniche visive per mostrare dove dovrebbero essere posizionati i bordi dei pezzi di prepreg: mascherina in foglio e proiezione laser.

Prima della introduzione della proiezione laser, per i componenti con lay-up critico con ply-drops, il laminatore aveva bisogno di applicare una mascherina in foglio sopra lo stampo e poi sopra ciascuno strato applicato quindi marcare le successive posizioni dei margini del ply usando un marcatore a penna non contaminante. Il laminatore comincia la laminazione stendendo ciascun ply seguendo il margine marcato più critico e lavorando all'esterno del margine del componente, togliendo ogni eccedenza.

La proiezione laser è una innovazione ingegnosa, tuttora fondamentale e molto efficace che riduce notevolmente il tempo di lay-up e migliora la qualità. Al posto di un laminatore che segue un progetto disegnato, un laser ed uno dispositivo a specchio producono una precessione molto rapida del

punto del laser attorno al ply progettato producendo una luminosa linea rossa elettrostatica. La linea viene prodotta da un proiettore laser sospeso connesso con un personal computer che converte dati di progetto del ply con dati sulla curvatura dello stampo da fornire al vero margine del ply.

Debulking (Compattazione):

Un risultato sfortunato dovuto alla natura dei prepreg di alta qualità, è l'inevitabile intrappolamento d'aria tra gli strati. Anche dopo avere forzato fuori le sacche d'aria visibili, sacche d'aria molto sottili possono rimanere. Se queste non vengono rimosse prime del processo di curing, i laminati risultanti possono presentare bolle d'aria intrappolate. Se la concentrazione di bolle o di vuoti è abbastanza alta, il laminato può essere esposto a cracking della matrice e a delaminazione.

Un processo conosciuto come debulking viene utilizzato per rimuovere l'aria intrappolata. Nylon riutilizzabile, o una membrana di gomma naturale o di silicone viene sigillata attorno alla periferia dello stampo sopra al lay-up con un tappeto di tessuto traspirante posto in mezzo e con il vuoto applicato al lay-up. Il lay-up diviene compresso e durante un periodo di circa 30 min gli strati vengono schiacciati più strettamente assieme, e l'aria viene rimossa. Questo processo viene compiuto per spessori tra 0.5 a 2 mm di lay-up. Sebbene questa fase sottragga efficienza al processo, il laminatore può usare l'interruzione per organizzare la documentazione ed i materiali.

Il processo di debulking ha un secondo benefico effetto che deriva dalla ulteriore compattazione. Dopo la fase di debulking, il lay-up viene consolidato ad uno spessore molto vicino a quello del laminato finito. Conseguentemente, quando il componente completamente laminato viene sottoposto a curing in un forno od in una autoclave, i plies esterni non dovrebbero restare raggrinziti. Senza le fasi di debulking, i plies esterni tendono a raggrinzirsi dato che il lay-up sotto li comprime (Fig. 2.5 Debulking del lay-up di una auto monoscocca da corsa).



Figura 2.5: Debulking del lay-up di una auto monoscocca da corsa

Preparazione per il curing:

Quando il lay-up è completato e controllato, necessita di essere sigillato in modo tale che esso possa essere compresso e sottoposto al trattamento di curing secondo uno specifico ciclo di pressione e di temperatura. Questo varia da vuoto con solo curing (forno) alla temperatura di 120°C applicata per 1 o 2 h per parti non critiche rispetto al peso, a curing con autoclave con una pressione tipica di 5 bar con applicazione di temperatura secondo un profilo accuratamente studiato per un periodo di 5 o più ore, per parti critiche come strutture di velivoli. I prepregs per vacuum cure (a forno) hanno un contenuto in resina leggermente superiore di quelli per curing ad alta pressione (autoclave); la frazione di fibre in volume del laminato per laminati prepreg tessuti con curing a forno è approssimativamente del 54%.

Per applicazioni che possano sopportare gli alti costi dei materiali di consumo, vengono applicati al lay-up quattro strati di materiale:

- *Peel ply* (struttura tessuta di poliestere qualche volta con trattamento elettrico di effetto corona per una facile rimozione): per fornire un piano uniforme che protegge la superficie durante le successive operazioni prima della saldatura.
- *Release film* con piccoli buchi (film sottile forato da spilli punzecchianti “pin prickled”): per permettere la fuoriuscita di aria e volatili dalla superficie superiore del lay-up. I film di rilascio con perforazioni facilitano la rimozione della resina (bleeding) mentre tipi senza buchi impediscono il bleeding (emorragia di resina).
- *Breather cloth* (tamponi in fibre di poliestere): per favorire l’espulsione di aria e volatili per mezzo di una pompa a vuoto.
- *Vacuum bag* (film di nylon) con guarnizione sigillante di gomma altamente aderente: per isolare ermeticamente il lay-up dall’aria calda del forno o dell’autoclave.

Un tipico ciclo di cura svolto in autoclave può essere illustrato dai seguenti diagrammi (Fig. 2.6):

1. andamento della temperatura di polimerizzazione in autoclave in funzione del tempo di durata del processo espresso in minuti.
2. andamento della depressione di aspirazione dal sacco in funzione del tempo.
3. andamento della pressione in autoclave in funzione del tempo.

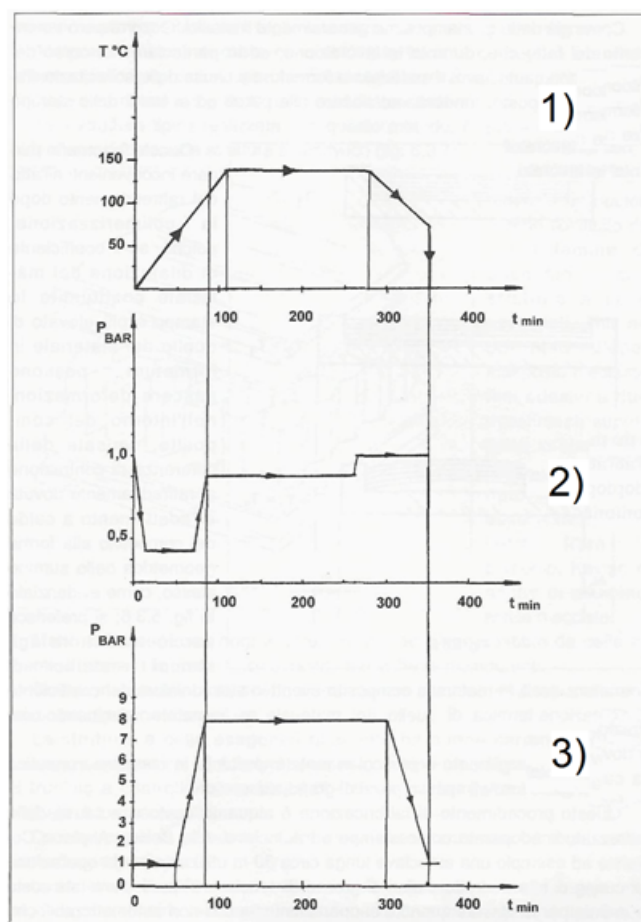


Figura 2.6: Ciclo di cura svolto in autoclave

Con la pompa a vuoto si inizia creando una prima forte depressione iniziale, che consente di aspirare l'aria contenuta nel sacco. Contemporaneamente inizia a crescere la temperatura, e dopo un certo periodo di tempo la pressione interna all'autoclave.

I cicli rappresentati sono quelli tipici della resina epossidica. Il ciclo avviene con un riscaldamento lento del materiale dalla temperatura ambiente fino a quella di polimerizzazione, che è ordinariamente non molto superiore ai 100 °C, come ad esempio nei valori visti per i vari tipi di resine epossidiche oggi usate. Contemporaneamente la pompa a vuoto esercita una prima marcata depressione nel sacco a vuoto, che elimina gran parte dell'aria contenuta nel sacco stesso.

Con il procedere del riscaldamento la depressione viene resa meno marcata ma costante, mentre la pressione all'interno dell'autoclave viene portata a regime in modo sufficientemente rapido.

Questo aumento di pressione, associato ad una debole o nulla depressione nel sacco, favorisce la fuoriuscita della resina in eccesso e delle sostanze volatili dall'interno del composito stratificato. La resina passa nel materiale assorbente. Contemporaneamente la viscosità della resina aumenta e la temperatura di polimerizzazione si stabilizza, mantenendosi su uno o due diversi e successivi valori costanti per tempi prolungati. Terminata la polimerizzazione si lascia raffreddare l'assieme mantenendo sempre la pressione all'interno dell'autoclave.

Al termine, tolta la pressione, si estrae lo stampo dall'autoclave. Il tempo di durata del processo è

determinato principalmente da quello di permanenza alla temperatura di curing prevista. Tale permanenza è motivata dalla necessità di avere un indurimento non inferiore al valore desiderato nell'interno dell'intero composito trattato. Il processo sarà completato quando anche nelle parti del materiale che si trovano alla temperatura più bassa viene raggiunto il valore di durezza desiderato.

Al termine dell'operazione, estratto l'assieme dall'autoclave, dissigillato il sacco ed estratto il pezzo esso verrà rifinito ed avviato all'utilizzazione. Lo stampo subirà il processo di pulizia e preparazione visto, per essere poi portato ad un nuovo ciclo di produzione.

Come già detto gli stampi sono generalmente metallici. Occorre però tenere conto del fatto che, durante la lavorazione, ed in particolare nel corso del curing fatto in autoclave, il materiale in formatura a causa delle sollecitazioni al quale è sottoposto, tenderà ad aderire alle pareti ed ai bordi dello stampo stesso. Questo fenomeno può dare inconvenienti all'atto del raffreddamento dopo la polimerizzazione, poiché, se il coefficiente di dilatazione del materiale costituente lo stampo è più elevato di quello del materiale in formatura, possono nascere deformazioni nell'interno del composito, causate dalla differenza di contrazione al raffreddamento dovuta all'adattamento a caldo del composito alla forma geometrica dello stampo stesso; si preferisce perciò sostituire agli stampi metallici di formatura quelli in materiale composito aventi lo stesso valore del coefficiente di dilatazione termica di quello del materiale in formatura, eliminando così tale fenomeno.

Questo è un processo molto difficile e costoso sia per la manodopera che per i materiali.

Proprietà dei componenti

Nella storia delle strutture in compositi, i prepreg utilizzati con lay-up manuale sono stati usati per modellare parti molto diverse. Ne sono esempi: estremità di contenitori per smaltimento di liquami, supporti per apparati solari satellitari, balestre per autocarri, trombette di aspirazione d'aria nei motori di Formula 1 e iniettori di carburante.

Queste diverse applicazioni utilizzano materiali specificatamente adattati per fornire prestazioni di altissimo livello. Per esempio fibre di aramide associate a resine con bassa adesione alle fibre possono essere impiegate in laminati che non sono perforabili da proiettili a bassa velocità. Strutture di satelliti spaziali sono ottimizzate in funzione della estrema leggerezza e di una robustezza appena sufficiente a resistere affidabilmente alle vibrazioni del lancio. Tali strutture possono avere una durezza di laminato fino a 280 GPa più del doppio dei laminati unidirezionali standard in fibra di carbonio. Una limitazione con gli attuali prepreg a matrice di resina polimerica è la massima temperatura di servizio di circa 270°C. Materiali con matrici non polimeriche non sono disponibili per prepreg in lay-up manuale poiché essi non sono viscosi.

Il processo di lay-up manuale può utilizzare tutti i tipi di fibre di rinforzo in forma di nastro o di tessuto. Il range di durezza delle fibre va dalle E-glass, che forniscono laminati con moduli di tensione superiori a 42 GPa ai moduli estremamente alti delle fibre di carbonio "pitch-based" utilizzate in laminati con moduli di tensione superiori a 490 GPa. Può essere impiegata qualsiasi tipo di resina che può essere formulata per fornire un'alta viscosità in modo tale che il prepreg abbia superfici viscosi. Le più comuni matrici resinose sono gli epossidi e questo per la loro resistenza,

per la forza di adesione alle fibre e per il lento curing che fornisce un tempo di conservazione in freezer (periodo di lay-up) fino a molte settimane. Il loro limite superiore di temperatura di servizio è attorno a 150°C in un ambiente caldo e umido e perciò per temperature di servizio più alte sono state sviluppate le resine di bismaleimide con un limite attorno a 200°C e poi le polimidi con un limite attorno a 270°C (520 °C) [45].

2.2 Prepreg per media serie

L'utilizzo di tessuto preimpregnato per la realizzazione in media serie di parti strutturali per il settore automotive non può che passare attraverso una forte automazione del processo di deposizione del prepreg ed all'eliminazione degli step di compattazione in sacco a vuoto e cura in autoclave attraverso un processo di compattamento e cura in pressa calda.

2.2.1 Automated Tape Laying

Il Processo

Un nastro di grafite in matrice epossidica unidirezionale è fornita in rotoli su di una guida di carta e tipicamente di spessore 75, 150 e 300 μm . In applicazioni di precisione si usano le misure 75 e 150 μm , in applicazioni estese e piane le 150 e 300 μm . Il rotolo è caricato sulla testa del tape-laying (Fig. 2.7). La testa è montata su di un ponte CNC a 4 assi per applicazioni piane e 5 assi per applicazioni di forma. Il procedimento si può mettere in relazione ad applicazioni per la laminazione di pannelli delle dimensioni tipiche del campo automotive.

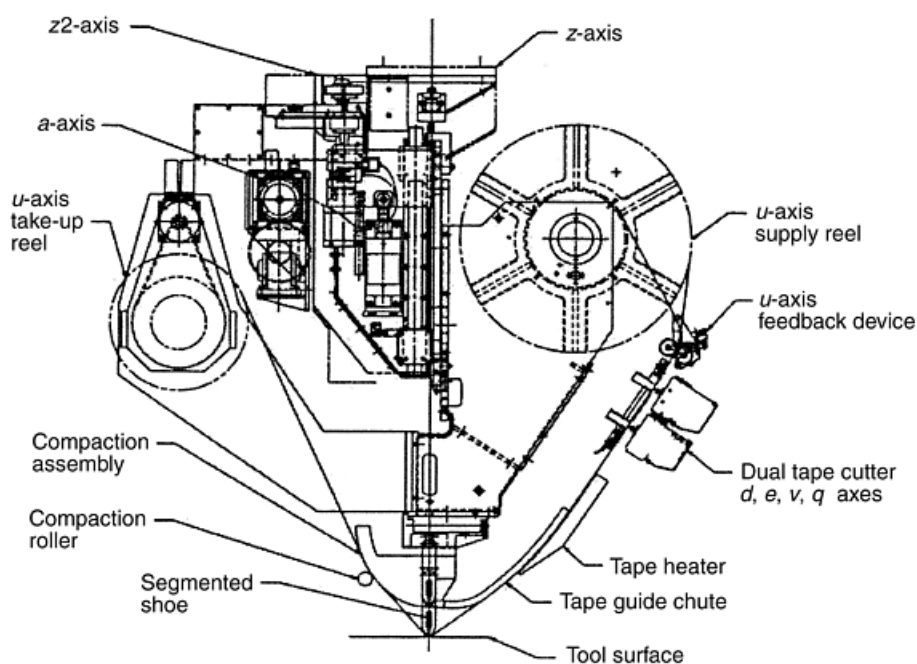


Figura 2.7: Testa del tape-laying

Il ponte posiziona la testa per il lay-up piano o di forma. Una tipica procedura consiste nel realizzare più passate di nastro a varie angolazioni. Una passata (ply) consiste in uno strato di nastro avente una traiettoria descritta da un dato angolo (Fig. 2.8).

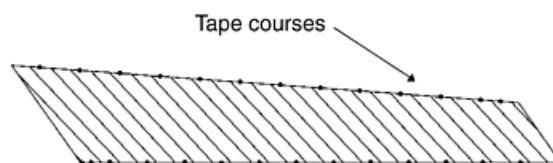


Figura 2.8: Passata

Le passate sono disposte l'una sopra l'altra in modo da creare un laminato. Per laminati piatti (generalmente chiamati lastre o pannelli), una volta che il lay-up è concluso, i laminati sono tipicamente rimossi dal letto di lay-up e trasferiti su di un tagliatore CNC dove le parti sono rifinite.

I pezzi tagliati vengono impilati e collegati a caldo con parti strutturali, quali nervature, scanalati a C, barre ad I ecc, o impilati su di una forma per realizzare pannelli sottili con forme predefinite. Le parti strutturali ottenute o i pannelli sottili possono essere sottoposte a cura separatamente o assemblate insieme e sottoposte a cura e unite insieme in un pannello di forma con rinforzi strutturali.

I laminati che sono disposti come una parte di forma rimangono di solito sull'attrezzaggio. L'attrezzaggio di forma e il laminato vengono trasferiti in autoclave per la cura o in un'area di assemblaggio dove sono collegate alle parti strutturali prima della cura.

Vantaggi: Questo tipo di processo permette una forte riduzione dei costi di fabbricazione rispetto alla tecnologia hand lay-up. Si è constatata una riduzione delle ore lavorative del personale del 70 – 85% rispetto alla tecnologia hand lay-up in riferimento alle realizzazioni di laminati piatti, ed un aumento del rateo produttivo fino ai 1000 kg/settimana.

Il rateo di lay-up realizzabili invece per la realizzazione di pannelli di forma dipende molto dalla complessità della geometria, dall'accuratezza richiesta, dallo spessore delle parti e dalla larghezza e tipo di nastro usato. Laminati e pannelli dalle geometrie non troppo complesse sono ottimamente realizzabili in tape laying. Maggiori sono le dimensioni dei pezzi da produrre, maggiore è la produttività in kg/anno del tape laying.

Altro vantaggio è che la testa del tape layer può ruotare di $\pm 190^\circ$; il che permette una grande flessibilità di realizzazioni di angolazioni, in particolare di angoli acuti. Possono essere realizzati spigoli con angolazioni che vanno da 0° a 85° .

Svantaggi: parti dalla geometria molto complessa non sono realizzabili in tape laying perchè il nastro tende a ripiegarsi e riempire le transizioni di piano. Può occorrere un supporto guida di carta. Piccoli pezzi non possono esser fabbricati con una grande produttività.

Descrizione dell'attrezzatura

Il ponte del tape laying più la testa contano possibili movimenti attorno a 10 assi, 5 sul ponte e 5 sulla testa, a controllo CNC per poter automatizzare la deposizione del nastro sulla superficie dello stampo in modo automatizzato. E' possibile la lavorazione di più pezzi simultaneamente grazie alla possibilità di avere più ponti sulle stesse guide. Altro vantaggio del ponte è la grande capacità di carico e scarico di pezzi durante la lavorazione del precedente/successivo evitando tempi morti.

Le guide parallele orizzontali lungo l'asse x di acciaio sono elevate e supportate da pilastini distanziati di 3.7 m. E' possibile una traslazione orizzontale della slitta lungo l'asse y e verticale della testa lungo l'asse z il che provvede ai movimenti trasversali e verticali della testa. Gli assi c ed a permettono la rotazione ed il basculamento della testa.

La bobina di nastro è caricata sulla parte frontale della testa (Fig. 2.7). Il nastro è fatto passare attraverso il sensore di posizione del nastro (feedback device), sopra la guida (tape chute) e i taglierini. Il segmento di nastro viene quindi deposto e compattato dalla spatola (segment shoe) e il supporto di carta viene riavvolto nel rocchetto posto nella parte posteriore. Il movimento del nastro è chiamato asse u. Il controllo del movimento e tensione del nastro è regolato dai due motori della bobina del nastro e della bobina riavvolgitrice.

Il compito dei taglierini è quello di recidere il nastro senza intaccare il sottostante nastro di supporto cartaceo, realizzando le angolazioni di taglio opportune per la corretta deposizione del nastro.

La spatola di compattazione è progettata per deporre il nastro di composito su superfici di geometria complessa, come ad esempio tasche, incavi, (Fig. 2.9), spigoli, mantenendo una uniforme distribuzione di forze di compattazione lungo la larghezza della spatola. La spatola è accompagnata anche da un rullo di compattazione che è necessario per la corretta compattazione dei nastri tagliati con angolazioni molto accentuate in strisce diagonali molto lunghe, per poter seguire correttamente le forme. Un sistema di controllo della compattazione del nastro permette di variare la pressione di compattazione durante la deposizione del nastro. La pressione è modificabile dal programma o dall'operatore stesso.

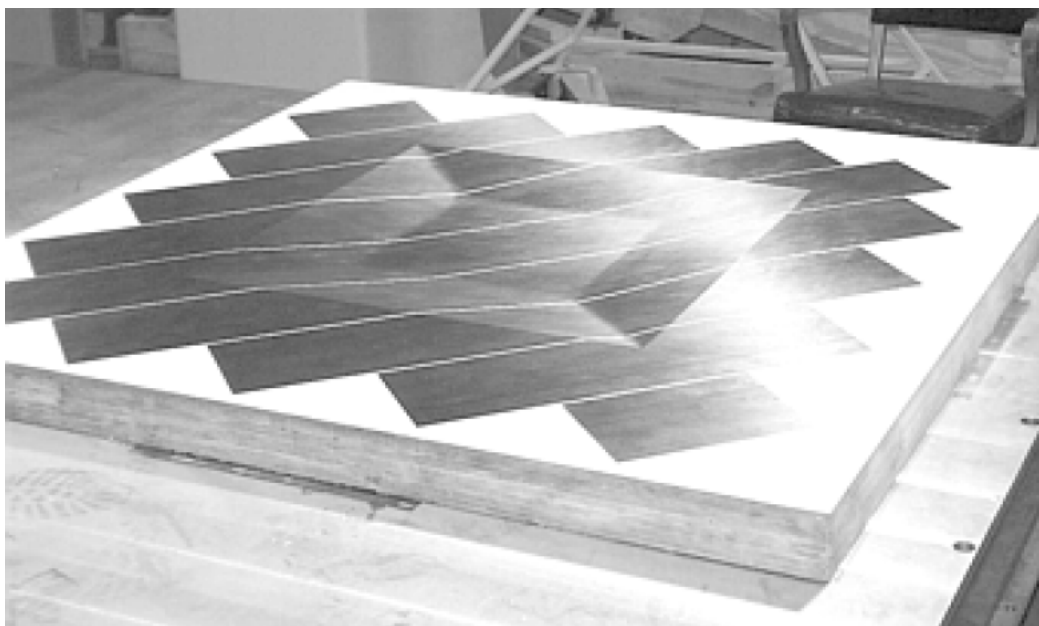


Figura 2.9: Deposizione su geometria complessa

La testa è equipaggiata con un sensore ottico che monitora lo scorrere del nastro che permette di fermare la deposizione quando un marker ottico è riconosciuto. La testa è equipaggiata con un sistema di riscaldamento del nastro. Per alcuni sistemi di resina secca che devono essere caratterizzati da bassi livelli di adesione nastro – nastro, il sistema di riscaldamento riscalda il prepreg per aumentare il livello di adesività subito prima della deposizione fatta dalla spatola. Tipiche temperature di riscaldamento sono da 26 a 43 °C [46].

Il programma di progettazione del processo fornisce i dati di input al sistema CNC. Sono necessari software che ottimizzino la traiettoria di deposizione del nastro cercando il migliore compromesso tra il seguire la traiettoria naturale determinata dalla forma del pezzo ed assicurare la giusta orientazione delle fibre a seconda dei carichi previsti.

L'utente definisce la superficie dell'utensile, le condizioni al contorno dello strato di nastro, i parametri progettuali, e i parametri di processo. Da questi input un programma crea automaticamente un codice (APT) che include i dati grafici, i dati di registro e il file di restart. L'APT viene poi compilato e postprocessato per creare il programma per il CNC per la deposizione.

Materiali e forme tipicamente utilizzati

In generale il nastro di alimentazione di materiale utilizzabile nei processi automated tape laying consiste in fibre di carbonio unidirezionali o di vetro impregnate con resina termoindurente, fornita in rotoli su di un nastro di supporto in carta dal diametro del cuore interno di 255 mm, e con margini di fibra riccamente impregnata con carta di rinforzo.

I rotoli di materiale composito per l'hand lay-up e per l'automated lay-up hanno requisiti diversi circa l'impregnazione della resina e l'eventuale carta di supporto. La resistenza e la facilità di

deposizione del nastro di carta di guida e sostegno sono molto importanti per realizzare con successo la tecnologia ATL, dovrà avere caratteristiche superiori rispetto al materiale di sostegno per la deposizione in hand lay-up. Per esempio se il nastro di guida non fosse abbastanza resistente e si rompesse, sarebbe necessario ricaricare il nastro. Condizioni del nastro scorrette vanno a modificare il comportamento di deposizione e compattamento. La relazione adesiva tra nastro di materiale deposto e nastro di sostegno di carta è importante in quanto se fuori controllo può causare ripiegamenti del materiale deposto durante la compattazione. Se il materiale composito impregnato si separa dal nastro di sostegno prima del taglio, della deposizione o della compattazione il lay-up non sarà di qualità. Altrettanto se il composito preimpregnato non si separasse facilmente dal nastro di sostegno dopo la compattazione.

Altro fattore chiave è l'adesione del materiale deposto sullo stampo o sul substrato sottostante. La distribuzione della resina tra le fibre (in configurazione impregnata o solo con superficie bagnata) condiziona l'adesione del nastro allo stampo di lay-up e agli strati successivi. Prepreg con troppa poca resina sulla superficie non aderirà bene a se stesso o alla superficie dello stampo e sarà richiesto un riscaldamento del nastro per incrementare il potere adesivo del materiale per la laminazione. Critiche in questo senso sono le resine bismaleimidiche ed altre resine epossidiche. Una buona impregnazione aiuta anche nel mantenere compatte le fibre durante la compattazione. Prepreg con troppa resina sulla superficie e all'interno del nastro tendono a far sì che le fibre durante la compattazione si separino.

Per esempio se metà materiale del nastro aderisce alla superficie del lay-up e l'altra metà resta sul nastro di sostegno, il nastro si spezzerà.

Considerazioni di progetto

Per il corretto uso del processo è necessario considerare il tipo di geometria che si vuole realizzare (laminati piatti o forme complesse): dipendentemente dalla complessità del pezzo, dimensioni e forma le tecniche di tape laying sono preferibilmente usate in presenza di forme medio-piatte. Parti dalla geometria molto complessa sono più adatte a tecnologie di fiber placement piuttosto che di tape laying.

Quando si considera la possibilità di realizzare un pezzo in automated lay-up, è necessario considerare i seguenti aspetti:

- Se gli angoli richiesti dalla forma e dalle fibre ricadono nel range di angoli permessi dal taglio,
- Se le richieste di contorno e forma dello stampo sono permesse dalla forma della testa,
- Gli incavi per l'iserimento dei rinforzi e gli angoli di sformo devono essere progettati affinché siano realizzabili dalla macchina senza piegature o strappi del nastro,
- Il materiale composito utilizzato deve essere adatto al pezzo ed al processo,
- La larghezza del nastro deve essere scelta con l'obiettivo di massimizzare il rateo produttivo e minimizzare gli scarti di lavorazione,

- Il materiale composito scelto deve garantire le prestazioni meccaniche richieste.

Nelle zone in cui le capacità della macchina non riescono a soddisfare le necessarie specifiche del pezzo in termini di forma o altro è necessario l'intervento manuale. Per ridurre questo è necessaria una buona progettazione del processo a monte della scelta dei materiali da utilizzare e delle capacità delle attrezzature utilizzate.

Considerazioni importanti devono anche essere fatte sulla superficie dello stampo e dell'utensile di lay-up. Questi vengono realizzati in speciali materiali che garantiscono il mantenimento della temperatura una volta che il nastro è stato deposto.

2.2.2 Prepreg + Pressa

Con l'obiettivo di una forte riduzione dei tempi e costi di ciclo per la realizzazione di componenti dalle caratteristiche meccaniche elevatissime, negli ultimi anni l'attenzione delle aziende e la ricerca nelle accademie si sta concentrando su quelle tecnologie che cercano di unire i vantaggi dell'uso di tessuti preimpregnati con l'utilizzo di metodi e tecniche di compattamento e cura che non facciano uso del trattamento di autoclave. Pochissime sono le pubblicazioni che approfondiscono la ricerca circa la tecnologia generalmente chiamata out-of-autoclave prepreg, o prepreg + pressa (o hot pressing).

Questa tecnologia cerca di unire le ottime caratteristiche meccaniche dei prodotti in manual prepreg lay-up con il più alto rateo produttivo che il compattamento e cura in pressa possono garantire.

Descrizione

Il processo consiste nella deposizione manuale o automatizzata di rinforzi preimpregnati su di un semistampo caldo, in modo molto simile a ciò che era fatto in manual prepreg lay-up, e nel sostituire le fasi di compattazione con sacco a vuoto e cura in autoclave con una più rapida compattazione e cura in pressa calda, allo stesso modo di ciò che è fatto per i prodotti SMC in compression molding. Nelle migliori applicazioni il tessuto prepreg viene preliminarmente preformato per permettere un facile e rapido caricamento nello stampo caldo. Le due metà dello stampo sono realizzate in materiale metallico e lo spazio chiuso dall'accoppiamento maschio-femmina definisce la forma e lo spessore del componente.

L'attrezzaggio è montato sui piatti di una pressa ed è usualmente riscaldato elettricamente o da sistemi ad olio o vapore. Nel caso di riscaldamento ad olio o vapore i condotti di passaggio sono direttamente ricavati nello stampo. Quando si usa elettricità, le resistenze vengono installate dentro allo stampo. Per componenti piccoli il calore può essere trasmesso attraverso piastre riscaldate all'interno della pressa stessa. Il ciclo di cura può essere accuratamente controllato in modo tale che il processo possa realizzare componenti dalle altissime proprietà meccaniche, con elevate tolleranze di stampaggio realizzabili ed il processo può essere velocemente automatizzabile.

A causa dell'elevato costo delle attrezzature questo processo è particolarmente adeguato a medi-alti volumi produttivi. Per produzioni di lotti poco numerosi possono essere realizzati stampi in nickel elettroformati o in fibra di vetro o spray metal.

Vantaggi L'utilizzo di tessuti preimpregnati che garantiscono un'ottima uniformità di distribuzione di rinforzo e resina permettono il raggiungimento di ottime proprietà meccaniche in termini di resistenza, modulo elastico e comportamento all'urto.

L'eliminazione della necessità di un'autoclave rende il processo di deposizione manuale o automatizzata di tessuti preimpregnati molto più appetibile per il mercato automobilistico di media serie, quale è quello a cui noi vogliamo rivolgerci, in quanto permette l'abbattimento di costi e tempi di ciclo altrimenti insostenibili. Ad un forte aumento di rateo produttivo corrisponde però la convenienza di realizzare stampi più duraturi in acciaio e quindi un calo della libertà di forme realizzabili in quanto vengono a dover essere rispettati quei vincoli tipici dei processi di stampaggio legati agli sforni, cioè alla necessità di estrarre la parte dagli stampi.

Questo tipo di processo sarebbe accompagnato da elevati costi di manodopera a causa del basso livello di automazione realizzabile nella difficile maneggiabilità degli appiccicosi prepreg e dalle difficoltà che si possono accompagnare all'estrazione della parte dalla pressa, che di solito viene effettuata a mano. Recentissimi sviluppi nella realtà industriale stanno portando alla luce la possibilità di elevare l'automazione sia del processo di deposizione, sia di estrazione dello stampo.

L'utilizzo di preimpregnati garantirà anche una ottima resa estetica, che l'uso della pressa al posto del sacco a vuoto riporterà su entrambi i lati del prodotto.

La tecnologia di prepreg + pressa risulta quindi molto promettente anche se ancora poco applicata.

Svantaggi Una tecnologia di prepreg + pressa altamente automatizzata presenta come svantaggio principale i notevoli costi di attrezzaggio e automazione. Per quanto riguarda vincoli di forma si può dedurre che dovendo estrarre la parte da stampo e controstampo metallici è necessario considerare vincoli di sformabilità più stringenti rispetto alle parti prodotte con la tradizionale tecnologia di stampo aperto, e per quanto concerne la possibilità di un'elevata automazione del lay-up, questa potrà essere realizzabile solamente per componenti dalla geometria non troppo complessa.

Probabili applicazioni

L'elevata automazione e minor tempo di ciclo rispetto all'autoclave rendono la tecnologia di prepreg + pressa molto interessante in quanto unisce la altissime caratteristiche meccaniche garantite dall'uso di preimpregnati e la ripetibilità e affidabilità del processo garantita dall'automazione. Probabili applicazioni sono pezzi dalla grande responsabilità strutturale e forme relativamente complesse quali quelli già realizzati in piccola serie in prepreg + autoclave.

2.2.3 MFP (Stamping of prepreg bundles)

Di interesse è anche un processo brevettato dalla azienda Duqueine [47], che consiste nello stampaggio di affastellamenti preimpregnati, sia in resina termoindurente che termoplastica. Anche se da investigare ulteriormente questo processo potrebbe garantire buone performance meccaniche per componenti strutturali di geometria complessa per produzione di massa. Nelle immagini possiamo

osservare gli affastellamenti (Fig. 2.10 sx), il premix (Fig. 2.10 dx), vari componenti aeronautici quali parti di motore e ali (Fig. 2.11).



Figura 2.10: Premix



Figura 2.11: Componenti aeronautici

2.2.4 Low - Temp Prepreg

Diverse sono le modalità con cui varie aziende cercano di svincolarsi dall'uso dell'autoclave per la compattazione e cura di preimpregnati. Alcune aziende invece di raggiungere la pressione e temperatura tipiche dell'autoclave, ma in pressa, cercano di rendere meno gravose le condizioni fisiche necessarie per il processo utilizzando chimiche di resine che permettono cura a temperature dell'ordine dei 60-100°C. Questo processo viene chiamato low-temp prepreg. Il modello di scorrimento di questo materiale permette l'utilizzo di sacco a vuoto per la compattazione, evitando la necessità dell'autoclave. Il grande limite di questa tecnologia consiste nella bassissima temperatura limite di esercizio, che non può superare quella di cura. Sotto di questa però il tempo di vita è paragonabile a quella dei tradizionali componenti in materiale composito [48].

Materiali utilizzabili

- Resine: Generalmente solo epossidiche.
- Fibre: Qualunque. Come per i convenzionali prerpeg.
- Cores: Qualunque, anche se inserti in PVC necessitano di speciali precauzioni.

Maggiori vantaggi

1. Tutti i vantaggi (1-4) tipici dell'uso di preimpregnati sono mantenuti nella tecnologia di low-temp prepreg.
2. Attrezzaggio dei materiali poco costoso, anche in legno, può essere utilizzato viste le basse temperature del processo di cura.
3. Possono essere realizzate grandi strutture di elevate proprietà meccaniche con l'utilizzo del semplice sacco a vuoto, mentre il basso riscaldamento può essere realizzato con semplici forni a circolazione d'aria, spesso costruiti in situ attorno al componente.
4. Possono essere utilizzati come core materials convenzionali materiali in PVC, provvedendo al fatto che siano tenute alcune accortezze nel processo.
5. Basso costo di energia.

Maggiori svantaggi

1. Il costo dei materiali è superiore rispetto ai tessuti non preimpregnati.
2. Per la cura del componente sono richiesti un forno e un sacco a vuoto.
3. Gli attrezzaggi devono poter resistere all'evoluzione di temperatura (60-100°C) dell'ambiente.

2.3 RTM

2.3.1 Introduzione ai processi di Injection Moulding

Numerose sono le tecnologie che vengono classificate nella categoria dei processi produttivi di injection molding. Resin transfer molding (RTM) e structural reaction injection molding (SRIM) costituiscono le due tipologie principali appartenenti alla famiglia dei liquid composite molding in cui è utilizzata pressione positiva maggiore di quella atmosferica per la guida del fluire della resina. Col nome di vacuum infusion sono raccolte invece quelle tecnologie appartenenti alla famiglia dei liquid composite molding in cui per la guida del fluire della resina è utilizzata l'evacuazione dell'aria nello stampo mediante la realizzazione di vuoto. L'aspetto in comune è l'iniezione di un polimero liquido attraverso un letto fermo di fibra. (Fig. 2.12).

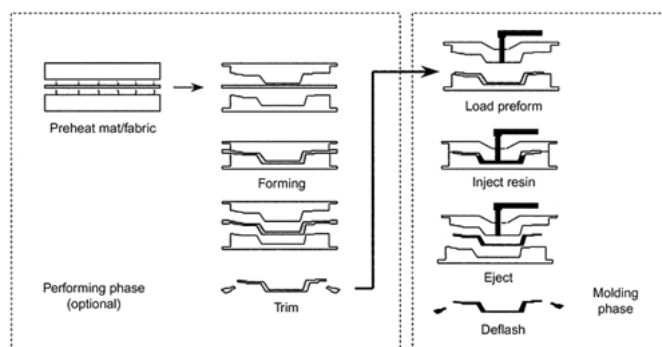


Figura 2.12: Processo

L'impregnazione avviene grazie ad un gradiente di pressione, e il modo con cui questo è realizzato e la natura del macchinario definiscono il processo. Possono essere identificate numerose varianti in aggiunta dei due processi principali nominati. Alcune di queste sono considerate varianti dei processi in cui il fluire della resina è guidato dalla presenza di vuoto e vanno sotto il nome di Vacuum infusion.

2.3.2 Caratteristiche del processo

Uno dei vantaggi del liquid molding è la grande flessibilità nella realizzazione del processo. L'attrezzaggio e il processo possono essere configurati in modo da seguire l'economia dell'applicazione. Per lo stampaggio di singole strutture di grandi dimensioni è comune l'utilizzo di impregnazione per mezzo di sacchi a vuoto, mentre per alti volumi è tipico l'utilizzo del processo reactive combinato con opportuni stampi in acciaio ed assemblaggio robotizzato di preforme di fibre per il raggiungimento del più alto rateo produttivo. Questa alta flessibilità permette processi economicamente ottimizzati su di un'ampio range di volumi di produzione. I tipici volumi di interesse sono circa di 35.000 pezzi/anno per l'RTM, e 100.000 pezzi/anno per lo SRIM. I processi di liquid molding possono competere con la maggiorparte delle alternative a stampo aperto e chiuso. I principali vantaggi e svantaggi sono riportati in Tab. 2.1.

Vantaggi del liquid molding	Svantaggi del liquid molding
Rispetto all' open mold/wet laminating	
Riduzione/eliminazione di emissioni di VOC	Alti investimenti di attrezzaggio e macchinari
Aumento di uniformità e garanzie di qualità	
Resa estetica su due facce	
Riduzione costo di manodopera	
Nei confronti del prepreg processing/sacco a vuoto e autoclave	
Riduzione dei costi del materiale	Maggior costo dei macchinari Produzione della resina in-house Grande responsabilità nel garantire la qualità
Riduzione costo di manodopera	
Possibile realizzare spessori maggiori-rimozione Dallo stampo più semplice	
Controllo diretto dello spessore e della frazione in volume delle fibre	
Uso flessibile del rinforzo e della resina	
Tempo di attrezzaggio minore	
Rispetto al compression molding/SMC, BMC	
Riduzione costo dei macchinari	Tempo di ciclo più lungo
Tempo di attrezzaggio minore	Produzione della resina in-house
Uso di preforme strutturali	Grande responsabilità nel garantire la qualità
	Necessità di grandi ambienti

Tabella 2.1: Vantaggi e svantaggi

I maggiori cambiamenti che questa famiglia di processi stanno subendo sono da attribuire a tre importanti fattori:

- Esistenti o possibili future norme circa la limitazione di emissioni di composti organici volatili (VOC). Queste sono largamente presenti nelle nuove applicazioni di vacuum infusion per produttori di piccoli volumi.
- Obiettivo di riduzione dei costi nell'industria aerospaziale. Esempio è il passaggio dall'uso dei costosi prepreg all'uso di resina ipossidica con RTM, resin-film infusion (RFI) e vacuum infusion.
- Mercati di nicchia nel settore dell'automotive. Per vetture prodotte in piccoli o medi volumi l'utilizzo di stampi di metallo risulta antieconomico. Sotto i 35.000 pezzi/anno una buona economia è possibile invece utilizzando la tecnologia del liquid molding invece che le tecnologie di sheet molding compounds (SMCs) (tecnologia di laminazione tradizionale).

A parte le operazioni di attrezzaggio che beneficiano degli investimenti in automazione, i due fattori principali sono l'iniezione ed il tempo di riscaldamento/cura. Sistemi di iniezione a gravità o a vuoto possono essere usati per produzioni di piccoli volumi o in fase di prototipazione, ma la maggior parte delle applicazioni industriali utilizzano sistemi ad alta pressione che operano tra i 2 ed i 10 bar. Portate tipiche sono da 1 a 3 L/min, anche se l'esatto volume dipende dalla strategia di condotti di ingresso di resina utilizzata, dalla resistenza all'impregnazione della fibra, e dalla natura del sistema di iniezione. Il sistema di controllo della tecnologia SRIM si può adattare variando tempi di riscaldamento e cura in funzione dello spessore della parte e della composizione della resina. Resina a base di uretano per SRIM può essere sufficientemente rigida per essere estratta dopo soli 40 secondi dal riempimento dello stampo, mentre grossi spessori di laminati in resina epossidica possono richiedere

alcune ore di permanenza nello stampo. La durata del processo è generalmente competitiva rispetto alla tecnica SMC per piccoli pezzi, dove 3 minuti può essere considerato un target ragionevole, mentre per parti più grandi ($>1 \text{ m}^2$) possono essere necessari 20 minuti o più.

La flessibilità nell'uso dei materiali è un'altro aspetto vincente del liquid molding. Le applicazioni industriali spaziano su di una grande varietà di stili di rinforzo, anche se la maggiore distinzione è tra settore aerospaziale a cui sono destinati tessuti specifici, e l'industria dell'automotive, dove rinforzi ad orientazione casuale sono spesso usati per parti in resa estetica o componenti semistrutturali. La tendenza odierna nel settore automobilistico e tra i fornitori sta convergendo verso la realizzazione in composito anche di parti strutturalmente importanti di telai e componenti meccanici dalla grande responsabilità strutturale. Potranno essere di interesse un'ampia gamma di stili di rinforzo, comprese le relativamente poche tipologie di tessuti usati nel prepregging, i meno convenzionali braids e weaves tridimensionali. L'architettura delle fibre impone i maggiori limiti alle frazioni di fibra permesse; il 65% in volume è un obiettivo realizzabile per pannelli piatti, mentre per rinforzi ad orientazione casuale il 35% rappresenta il limite massimo.

La riduzione dei costi rappresenta il fondamento logico per la maggiorparte delle applicazioni. I produttori di automobili cercano la riduzione dei costi di attrezzaggio, e questo comporta una finestra operativa che va a competere con le fasce basse delle applicazioni SMC (tipicamente sopra le 35.000 unità/anno). Al contrario, gli operatori nell'aerospace puntano a compensare gli alti investimenti associati all'RTM attraverso minori costi dei materiali in quanto la produzione di un prepreg intermedio è eliminata.

Un obiettivo comune verso la diminuzione dei costi è l'integrazione dei componenti, in quanto stampi e procedure di stampaggio più complesse sono ripagate da una forte diminuzione degli assemblaggi e gli investimenti di attrezzaggio. Chiaramente lo stesso approccio può essere esteso a strutture più complesse come dimostrano numerosi studi nel settore automotive.

2.4 Resin Transfer Moulding e SRIM

In questa sezione vengono trattati i processi in cui è utilizzata pressione positiva maggiore di quella atmosferica per la guida del fluire della resina.

2.4.1 Descrizione della tecnologia

La tecnica di base consiste nel disporre e fissare stabilmente la fibra di rinforzo all'interno dello stampo e controstampo, che viene chiuso realizzando la forma voluta e nell'iniettare resina liquida in pressione. Il rinforzo (preforma) può contenere inserti di schiuma rigida o altri materiali, mentre la polimerizzazione è realizzata da una resina termoindurente. Vi sono molte varianti di questo semplice approccio, sviluppati per aumentare la velocità di produzione, per ridurre i costi di attrezzatura, per aumentare le proprietà. Le varianti più importanti di questa tecnologia sono brevemente descritte di seguito:

STRUCTURAL REACTION INJECTION MOLDING (SRIM): si basa sulla chimica del poliuretano. L'alta reattività di questo materiale, una volta miscelato, porta ad un suo fluire molto rapido e completo all'interno della fibra. La chiave del processo SRIM sta nel raggiungimento della desiderata bassa viscosità reattiva in una testa di miscelamento ad impingement posto sullo stampo riscaldato. La realizzazione della pressione di iniezione è demandata ad un cilindro idraulico o ad una lancia. La velocità di ingresso è controllata per poter modificare il tempo di processo o le proprietà del polimero. I serbatoi di stoccaggio separati sono di solito riscaldati ed agitati, mentre i reattivi sono fatti ricircolare dalla testa di miscelamento ai serbatoi periodicamente in modo da mantenere l'intero sistema ad una temperatura prestabilita. Molti materiali sono sensibili all'umidità, il che richiede che i reattivi siano conservati sotto una copertura di azoto secco. Anche se i reattivi sono stabili se separati, una volta miscelati la polimerizzazione è molto rapida. Quindi per questo motivo è necessario liberare il dispositivo di miscelamento da ogni residuo di materiale a seguito di ogni iniezione. E' ora comune la presenza di un sistema di autopulizia della testa di miscelamento per impingement. Uno schema del processo è rappresentato in Fig. 2.13 , mentre un confronto sintetico tra RTM e SRIM è riportato in Tab. 2.2 .

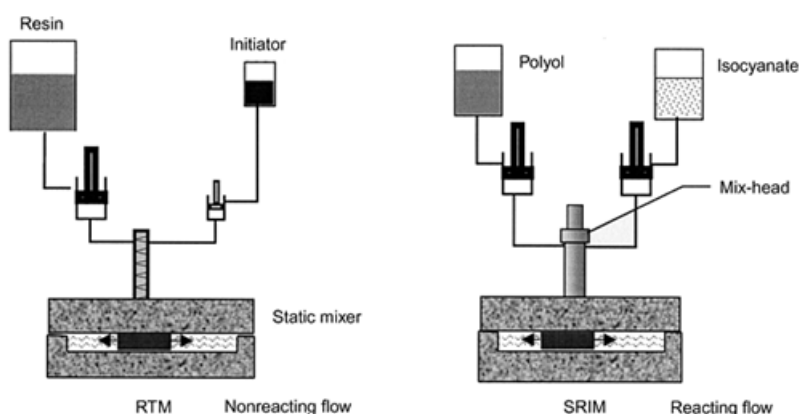


Figura 2.13: Schema del processo

Capability or characteristic	RTM	SRIM
Delivery pressure	Moderate	High
Mixing	Static	Impingement
Materials	Polyester/epoxies	Urethanes
Processing speeds	Slow/moderate	High
Investment required	Low	High

Tabella 2.2: Confronto tra RTM e SRIM

La maggiorparte delle attrezzature dei processi reattive coinvolgono due flussi. Occasionalmente un terzo flusso è utilizzato per aggiungere pigmenti. Elevati ratei produttivi e quindi di flusso necessitano che la risposta dinamica del sistema sia molto veloce, e che quindi il controllo del flusso sia molto

rigoroso. Per pistoni e per le lance alimentate da pompe questo è monitorato da trasduttori lineari. Attuatori idraulici sono usati solamente per i dispositivi distributori. In funzione di quali materiali siano processati, la temperatura dei reattivi può essere compresa tra i 30 e i 200°C, anche se per gli uretani di solito si attesta tra i 50 e i 90°C. I serbatoi e la struttura devono essere mantenuti alla necessaria temperatura per mezzo della circolazione di olio o acqua, mentre la linea di iniezione è mantenuta calda dalla circolazione dei reagenti. Per sistemi ad alta viscosità, le tracce di riscaldamento sono applicate sia per la linea di flusso della resina sia per le attrezzature.

VACUUM-ASSISTED RESIN INJECTION (VARI): gli stampi sono di solito dotati di uno sfogo. Un vuoto parziale è applicato per promuovere la morsa dello stampo, la compattazione del rinforzo ed aumentare il gradiente di pressione per l'impregnazione. La riduzione della pressione interna minimizza le deformazioni dello stampo, cosa che è particolarmente importante nella produzione di pezzi di grande dimensione con stampi leggeri e di basso costo. Studi hanno dimostrato che la riduzione di sacche d'aria garantita dal parziale vuoto che permette una bagnabilità migliore delle fibre assicura un forte miglioramento delle proprietà meccaniche.

VACUUM INFUSION (VARTM, SCRIMP): logica evoluzione del VARI è evacuare la cavità dello stampo completamente prima dell'impregnazione. Questa tecnica ha due importanti applicazioni:

- La realizzazione di composite per uso aerospaziale con basse frazioni di vuoto
- Produzioni con bassi investimenti iniziali per mezzo di attrezzature flessibili

Nel primo caso il vuoto (1-5 nn Hg) è generalmente accompagnato da una pressione positiva della resina iniettata, mentre nel secondo caso la resina è generalmente a pressione ambiente. Questo processo è comunemente chiamato VARTM, RIFT, SCRIMP ed è descritto in un altri paragrafi.

Nei vacuum-injection process il principio di funzionamento è che la cavità dello stampo ermetica, contenente una preforma, sia creata tra il sacco a vuoto e uno stampo relativamente rigido. Questa cavità è poi evacuata facendo in modo di compattare il rinforzo e rimuovere l'aria residua. La resina è poi introdotta nella cavità (di solito attraverso una linea di alimentazione periferica) ad impregnare il rinforzo avanzando verso il punto di aspirazione centrale. Finchè il processo è realizzato a pressione atmosferica, il grado di rigidità richiesta nell'attrezzatura è minimo. Lo stampo è generalmente un laminato in resina epossidica e fibra di vetro ricoperto da uno strato di gel coat con una matrice calda incassata in una struttura solida in resina epossidica. Finchè la differenza di pressione adottata è limitata ad 1 bar, la velocità della resina è minore di quella che si ha in un RTM convenzionale. Ma il fluire della resina dai distributori periferici può non essere abbastanza veloce e il tempo di riempimento quindi proibitivo per pezzi di grande dimensione. Perciò vengono utilizzati tessuti dalla maggiore permeabilità. Mentre la creazione di passaggi preferenziali del flusso attraverso la preforma è indesiderabile in quanto per l'eliminazione completa dell'aria è necessario un fronte di riempimento uniforme, la presenza del vuoto comporta una forte riduzione del pericolo di intrappolamento di sacche d'aria.

RESIN-FILM INFUSION (RFI). Questo processo viene spesso confuso con il tradizionale autoclave molding e vacuum infusion. Per guidare l'impregnazione è utilizzato un singolo stampo in combinazione con un sacco a vuoto. La resina è introdotta sotto forma di film o pallini solidi con-

temporaneamente al rinforzo. Il materiale di partenza viene accluso come nel convenzionale sacco a vuoto e l'assemblato ottenuto è portato attraverso un ciclo di riscaldamento e pressione a ridurre la viscosità della matrice sufficientemente per l'impregnazione prima nello stato di gel e poi per la cura. Il costo dei materiali è inferiore rispetto all'utilizzo di prepreg, e proprietà di alto spessore possono essere ottenute per mezzo di tessuti tridimensionali o dal ricamo complesso. Il campo maggiormente di attrattiva per l'RFI è probabilmente la realizzazione di grandi superfici. Finchè il flusso va su tutto lo spessore le dimensioni in piano sono relativamente poco importanti, al contrario del convenzionale RTM in cui la loro influenza sul tempo di riempimento è molto importante.

INJECTION-COMPRESSION MOLDING: si realizza caricando la preforma, chiudendo parzialmente la cavità dello stampo (Fig. 2.14), ed iniettando una quantità misurata di resina. Di quanto la metà superiore dello stampo viene tenuta distante dalla sottostante durante l'iniezione nella pratica varia, ma generalmente la distanza consiste in una piccola frazione dell'altezza della cavità. Un piccolo aumento in spessore porta però ad un grande aumento della permeabilità della preforma; questo perchè la resina può essere iniettata in modo relativamente veloce. Fino a quando la carica di resina è iniettata nella cavità espansa, questa impregnerà solo una porzione della superficie finale della parte. Il colpo di pressa finale va a colmare la distanza supplementare che era stata lasciata per migliorare la permeabilità e va a chiudere lo stampo sulla forma del pezzo finale, realizzando l'azione penetrante necessaria per causare il fluire nel piano della resina che va a riempire ogni cavità. Questa tecnica è stata utilizzata con successo nella realizzazione di spoiler automobilistici.

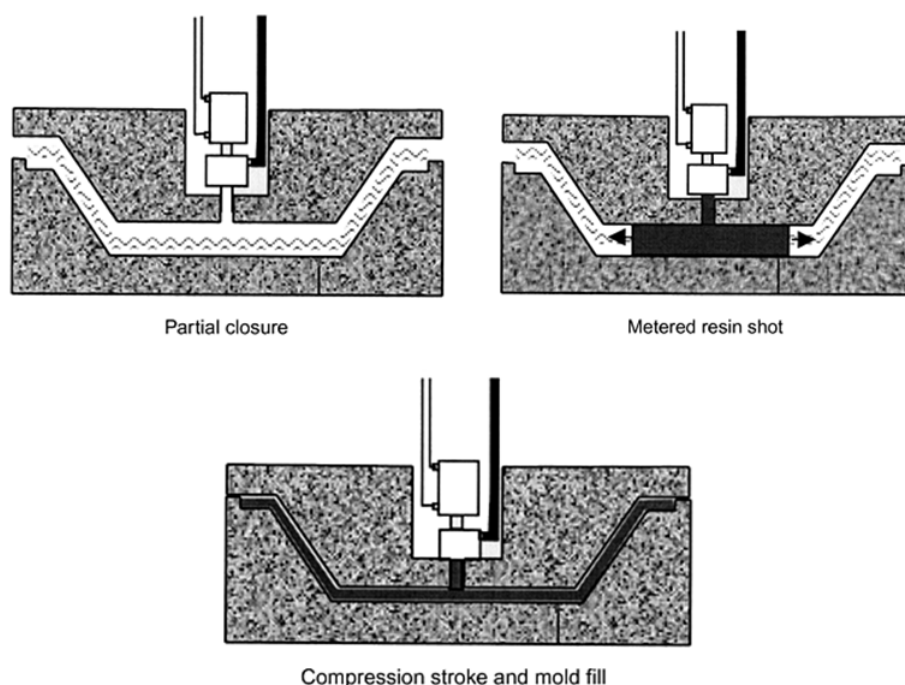


Figura 2.14: INJECTION-COMPRESSION MOLDING

2.4.2 Materiali e forme utilizzate

I materiali usati in liquid molding non sono molto diversi dai mat, tessuti e resine convenzionali utilizzati in wet laminating o press molding. Modifiche importanti sono invece fatte per quanto riguarda la viscosità della resina, il tempo di gel, l'architettura dei rinforzi per rendere più semplice il flusso della resina durante l'impregnazione.

MATERIALI DI RINFORZO: gli stampaggi possono avvenire con successo usando la maggior parte dei tessuti e forme tradizionali. Eccezione importante fanno i chopped-strand mat, che vanno di solito a formare preforme molto dense e poco permeabili. Alcuni tessuti sono prodotti specificamente per il liquid molding. Questi sono tessuti che aumentano la loro permeabilità se portati ad alta temperatura e contengono dei filamenti deformabili che vanno a creare dei canali locali per il passaggio della resina in zone altrimenti a bassa permeabilità.

La scelta fondamentale che va ad incidere sul progetto strutturale è la scelta del tipo di preforma. Questo influenza le orientazioni di fibre permesse e la loro frazione in volume. Parti prodotte in piccoli volumi o preforme semplici sono ottimamente assemblate manualmente nello stampo usando mats o tessuti. Rinforzi posizionati manualmente necessitano di una operazione post stampaggio di sbavatura per eliminare gli eccessi fuori forma. Altrimenti preforme che ricalchino la esatta forma finale si possono realizzare formando termicamente gli stessi materiali usando polveri termoplastiche. Sistemi convenzionali usano forni a infrarosso e processi di stampo low-cost, i quali spesso sono attuati pneumaticamente, finché la pressione richiesta è limitata a pochi bar.

Con la frazione in volume di fibre permesse da queste tecnologie si possono raggiungere performance del materiale di 10 Gpa di modulo elastico e 120 Mpa di resistenza. Per performance superiori sono utilizzati tessuti rinforzati che includono una grande varietà di prodotti woven chiamati zero crimp (nessuna ripiegatura) o tessuti appositamente progettati. Questi ultimi offrono grande flessibilità indipendentemente dal metodo produttivo utilizzato e sono realizzati in multistrato legati insieme da yarn non strutturali. Le configurazioni degli strand possono essere quasi unidirezionali, $0^\circ/90^\circ$, $\pm 45^\circ$, e quasi isotropici ($0^\circ/+45^\circ/90^\circ/-45^\circ$ o $-60^\circ/+60^\circ/120^\circ$). Il tipo di rinforzo usato influenza i costi di set up, le proprietà meccaniche finali, e la complessità con cui vengono realizzate forme complesse e l'impregnazione delle fibre. Degne di nota sono le grandi proprietà strutturali dei tessuti woven tridimensionali in applicazioni che richiedono grandi spessori e alta energia specifica di frattura cioè buone proprietà di assorbimento degli urti, e tessuti realizzati tramite la tecnica del braiding, che nella realizzazione di sezioni chiuse (particolarmente componenti tubolari) fornisce grande resistenza biasiale e buone proprietà torsionali. Queste tecniche rappresentano i fronti di interesse in applicazioni aerospaziali in cui viene ricercata la realizzazione di geometrie complesse accompagnata dalla possibilità di bilanciare l'andamento degli spessori con i rinforzi richiesti, permettendo così una grande flessibilità progettuale.

CARATTERISTICHE DEL PROCESSO DI RINFORZO: la relazione tra pressione di compattazione e frazione in volume di fibra è importante e determina la forza di stampaggio che deve essere fornita per garantire il determinato spessore del laminato. La forza di compattazione può risultare

dello stesso ordine di grandezza della pressione della resina. La rigidità trasversale è funzione della temperatura e del grado di saturazione che si manifesta a causa delle caratteristiche di rammollimento e a causa degli effetti della lubrificazione.

La permeabilità è definita dalla legge di Darcy e descrive la facilità con cui la resina può impregnare il rinforzo. In generale la permeabilità diminuisce esponenzialmente con l'aumento della frazione in volume delle fibre ed è maggiore per rinforzi dall'orientamento casuale rispetto a quelli con fibre allineate.

Il tempo necessario per impregnare una data geometria e per una data e costante pressione della resina è generalmente proporzionale al rapporto tra porosità (frazione di vuoto) e permeabilità. Al contrario quando viene usato un dispositivo di pressione positiva la pressione richiesta per impregnare una data geometria dovrà essere proporzionale all'inverso di tale rapporto. Perciò il progetto del rinforzo è strettamente connesso alle caratteristiche dei macchinari di processo e al tempo di ciclo.

E' necessario ricordare che la misura di permeabilità fornita dall'equazione di Darcy fornisce una descrizione molto approssimata del processo di impregnazione. La struttura del rinforzo è generalmente eterogenea e queste variazioni possono portare a spazi tra i filamenti importanti che generano durante l'impregnazione dei canali preferenziali che provocano microvuoti tra gli yarn. Questi problemi possono essere ridotti dall'ausilio delle tecniche a vuoto e riducendo la portata di resina per aumentare la penetrazione per capillarità. Quest'ultimo metodo è però industrialmente non realizzabile perché molto lento. Porosità possono essere causate anche dalla presenza di aria intrappolata nella resina liquida durante la miscelazione (eliminabile con degasaggio) e dalla presenza di aria nella cavità dello stampo.

Quando sono presenti curvature complesse nel pezzo è consigliabile fare attenzione alle possibilità di formabilità del rinforzo. Rinforzi random possono tollerare trazioni monoassiali di circa il 30% inferiori al limite a rottura prima di stirarsi. I tessuti si deformano attraverso un meccanismo diverso a causa della presenza di fibre rettilinee e inestensibili. Il meccanismo dominante è lo scorrimento interplanare e molti materiali evidenziano comportamenti tensione-deformazione non lineari dopo il cosiddetto angolo di locking. Il confronto di queste caratteristiche può essere realizzato facendo misure su di un semplice parallelogrammo di materiale di rinforzo. Molto importante è conoscere il punto da cui parte il locking, che è usualmente individuato nel punto in cui diventa evidente il corrugamento del tessuto, e ciò accade circa attorno ai 30° di scorrimento.

RESIN SYSTEM: la maggior parte dei tipi di resina può essere utilizzata nei processi liquid molding, incluse poliestere, acriliche, fenoliche, epossidiche e bismaleimidiche. Il parametro di controllo è la viscosità che gestibile sino ad un limite superiore di 0.8 Pa•s (simile all'olio motore). Quando al viscosità eccede questo valore, può essere necessario introdurre altra resina preriscaldata o un reattivo diluente a bassa viscosità. Quest'ultimo è usato largamente per vacuum infusion a causa delle basse pressioni realizzabili nel processo. Le resine epossidiche vengono divise in tre categorie: composizioni a viscosità molto bassa (0.3 Pa•s) per vacuum infusion, in cui vengono utilizzati diluenti per ridurre il tempo di riempimento, composizioni a media viscosità (0.5 Pa•s) per RTM, e resine alto performanti le quali richiedono un forte riscaldamento per raggiungere la bassa viscosità necessaria

per poter essere iniettata. Sono anche state sviluppate composizioni epossidiche per SRIM che combinano bassa viscosità (usando preriscaldamento) con una grande reattività di indurimento per dare rapidi riempimenti e cure veloci (<5min), anche se applicazioni significative non sono ancora emerse.

SRIM resta per di più appannaggio solamente delle resine poliuretaniche. Queste differiscono leggermente dal convenzionale sistema RIM in quanto il tempo di gel è esteso per tener conto del più lungo tempo di riempimento che accompagna l'uso di una preforma. Per ottenere il giusto compromesso tra rapidità del processo e semplificare l'uso delle resine poliestere sono state sviluppate resine ibride per l'RTM. Queste usano monomeri stirenici con un componente isottanico, insieme con il convenzionale agente di cura perossido organico. Anche se in teoria tutti i processi liquid molding usano resine termoindurenti, vi sono molte applicazioni in cui vengono utilizzate matrici termoplastiche. Dal momento che il maggior limite all'utilizzo delle matrici termoplastiche in liquid molding era l'alta viscosità che rendeva difficile l'impregnazione, una soluzione potenziale è l'impregnare usando monomeri e polimerizzare il termoplastico in situ. La tecnologia qui utilizzata è quella del RIM, nella quale, a parte l'uretano, l'applicazione più conosciuta è con poliammide 6 e poliammide 12, in cui viene prodotto direttamente un prepreg termoformabile. Per eliminare problemi successivi allo stampo, è stato sviluppato un sistema di attivatori e catalizzatori liquidi da aggiungere alla resina. Altra tecnologia che utilizza matrici termoplastiche è la cosiddetta tecnologia "cyclics", che consiste nell'impregnare il rinforzo con una resina termoplastica a bassa viscosità prepolimerizzata, la quale successivamente reagisce in presenza di calore ed un catalizzatore che aumenta il peso molecolare attraverso la conversione delle sue corte catene molecolari in strutture lineari in una reazione di polimerizzazione ad anelli aperti. Questa tecnologia ha conseguito buoni risultati con PBT e policarbonati.

CURING: a differenza del compression molding SMC, la cura di parti formate con injection molding si realizza in modalità generalmente non uniformi. Questo è causato dalla diversa variazione termica e storia chimica che la resina ha subito dalle bocche di iniezione agli sfoghi di uscita. Queste differenze sono classificabili per lo più come processi non isotermini (ne è esempio il caso di resina fredda iniettata dentro ad uno stampo caldo). Nella maggior parte delle situazioni le zone vicine agli sfoghi di uscita subiscono la trasformazione di cura per primi e le più fredde zone vicine alle bocche di ingresso per ultime. Sono necessarie drastiche misure per correggere o invertire questa tendenza. Una prima possibile soluzione è quella di iniettare dalle bocchette con dosatori regolabili con tempi di inizio iniezione sfasati, mentre una seconda usa un'affinata tecnica di preriscaldamento della resina. Nei processi quasi isotermini (o quando il tempo di gel della resina è molto più lungo del tempo di riempimento), lo stampo raggiungerà un equilibrio termico prima dell'inizio della cura, perciò l'andamento della cura sarà più o meno uniforme. Gradienti di avanzamento di cura nel piano non causano alcun particolare problema. Ogni rimanente disuniformità nel grado di cura può essere eliminato con processi di postcuring della parte. Problemi lungo lo spessore possono invece essere più gravi. Il maggiore problema in questo caso è il relativo spessore che può essere soggetto a surriscaldamenti e fratture interlaminari durante la polimerizzazione. Il primo problema può essere risolto semplicemente modificando la composizione della resina (riducendo la concentrazione di acceleranti

o aumentando gli inibitori) per produrre una meno reazione meno vigorosa. Il secondo problema può portare a indesiderate incurvature delle piastre il che è funzione del ritiro della resina, orientazione delle fibre e rapporto spessore diametro caratteristico del pezzo. Questo può essere risolto in molti casi aggiungendo degli additivi che aumentino la flessibilità, riducendo la porzione di rinforzi cerchiati o riprogettando il pezzo.

2.4.3 Proprietà del componente in RTM

In un processo RTM avvenuto con successo le proprietà del pezzo sono determinate nel modo consueto dalle caratteristiche della fibra di rinforzo e dalla resina matrice.

Il parametro principale è nella maggior parte dei processi il range di frazione in volume di fibre al quale un dato rinforzo può essere processato. Qui è imposta una banda stretta per poter realizzare la corretta bagnabilità delle fibre. Questo è raggiunto imponendo una adatta pressione di compattazione allo stampo.

- Limitazioni alla frazione in volume di fibra imposta dalla geometria della parte. Questo può essere determinato empiricamente o stimato per mezzo di appositi software che propongono disposizioni del tessuto ottimizzate.
- Allineamento delle fibre derivante dalla deposizione della preforma. Il medesimo software aiuta anche in questo.
- La solubilità dei reticoli delle preforme nella resina matrice può avere un'influenza significativa sulla resistenza finale e sulla temperatura di transizione vetrosa.

2.4.4 Valutazioni sull'impiego di Injection Moulding in vetture di media serie

La ricerca di prestazioni sempre maggiori e l'introduzione di sempre più stringenti normative antinquinamento stanno però negli ultimi anni spingendo i costruttori di vetture supersportive ed anche le grandi case automobilistiche, verso la riduzione dei pesi delle autovetture, che non può che passare attraverso l'utilizzo di materiali dall'alto rapporto prestazioni meccaniche/peso quali sono i materiali fibrorinforzati.

Il campo dei materiali compositi è caratterizzato dalla peculiarità di non poter disgiungere la progettazione del materiale da quella della geometria della parte e del processo, quindi nell'affrontare la progettazione di componenti strutturali in materiale composito il progettista meccanico ed il tecnologo si trovano a dover collaborare sinergicamente nel design for manufacturing delle parti.

I criteri di scelta dell'utilizzo di una determinata tecnologia sono quindi molteplici e la selezione per analisi comparativa tra i vari processi disponibili può assumere significato in termini di macrodistinzioni, essendo questo un settore in continua evoluzione in cui l'innovazione modifica a ritmi elevatissimi il panorama tecnologico di riferimento. Può essere quindi utile fornire delle linee guida di scelta attraverso la loro analisi comparata con particolare attenzione ai seguenti temi di indagine e confronto (drivers):

- Prestazioni strutturali (resistenza statica e rigidezza; modulo elastico; frazione in volume di fibre; prestazioni in riferimento all'urto)
- Costi (tempi e ratei produttivi; costo di manodopera; costi di attrezzamento e ripetibilità ed affidabilità del processo)
- Vincoli di natura morfologica (geometria del componente; limiti sulla resa estetica)

2.4.5 Prestazioni meccaniche

La natura stessa del processo impone alcuni importanti limiti per quanto riguarda le caratteristiche meccaniche dei prodotti finali. La procedura di impregnazione del rinforzo secco è progettata in base alle leggi che governano la permeabilità delle fibre, quali la legge di Darcy. Ma nonostante la possibilità esecutiva di un controllo abbastanza rigoroso del fenomeno, i processi di injection molding non possono garantire gli stessi livelli di uniformità di distribuzione di resina e bassa percentuale di vuoti dei processi in cui sono utilizzati rinforzi preimpregnati. Inoltre le resine utilizzate in questi processi debbono avere basse caratteristiche di viscosità per poter garantire una buona permeabilità tra le fibre. A bassa viscosità corrisponde però un aumento della fragilità una volta sottoposta al trattamento di cura. Altro aspetto che inficia le proprietà meccaniche dei prodotti realizzati in injection molding è la difficoltà di utilizzare fibre unidirezionali con funzione di rinforzi localizzati, in quanto queste verrebbero generalmente spostate rispetto alla loro deposizione dal fluire della resina.

Per questi motivi le proprietà meccaniche dei prodotti realizzati in injection molding sono generalmente peggiori rispetto a quelle dei prodotti realizzati con rinforzi preimpregnati. Tipiche applicazioni sono pannellature e parti semistrutturali quali appendici aerodinamiche, coperchi e parti di carrozzeria.

Il processo di vacuum infusion presenta caratteristiche meccaniche ancora inferiori in quanto ad una minore pressione di infusione corrisponde una peggiore compattazione degli strati di tessuto ed una maggiore tendenza alla delaminazione.

Solamente processi accuratamente controllati e ad alta pressione di iniezione che possano dare ottime garanzie sull'uniformità della distribuzione di resina e sulla buona compattazione possono estendere il campo di impiego a componenti dall'elevata responsabilità strutturale quali parti di telaio.

E' però possibile l'utilizzo di riempitivi quali schiume e pannelli sandwich per la modifica delle proprietà strutturali.

Si può evidenziare come il processo di iniezione non sia stato in grado di assicurare il corretto centraggio dell'anima in schiuma di poliuretano, rendendo la superficie esterna in materiale composito in fibra di vetro di spessore non uniforme.

2.4.6 Prestazioni in riferimento all'urto

Le peggiori caratteristiche meccaniche rispetto alle altre tecnologie produttive si riflettono anche nelle prestazioni in riferimento all'urto. La maggiore fragilità del materiale composito e la struttura meno

compattata e densa sono precursori di una bassa tenacità dello stesso, e conseguentemente di un basso livello di assorbimento di energia in caso d'urto.

Per quanto riguarda in particolare il vacuum infusion, la minor compattazione realizzabile a causa della minor pressione di infusione rispetto all'RTM comporta un peggiore comportamento meccanico soprattutto in caso di urto, in cui l'interazione interlaminare è molto importante.

Nella realizzazione di strutture per assorbimento energie d'impatto si possono però trovare alcune applicazioni in cui processi RTM di elevata qualità vengono convenientemente usati al fianco degli esistenti processi in prepreg.

2.4.7 Ripetibilità ed affidabilità

La formatura in stampo garantisce un migliore controllo dimensionale rispetto alla tecnologia di manual prepreg lay-up e quindi la realizzazione di forme ripetibili è maggiore, fatto che facilita le successive operazioni di assemblaggio con conseguente riduzione dei costi.

La votazione data è però inferiore rispetto al processo di compression molding in quanto alla ripetibilità delle forme corrisponde una scarsa ripetibilità delle caratteristiche meccaniche. Anche con i migliori sistemi di controllo della procedura di iniezione, i processi di injection molding non possono garantire una ottimale distribuzione uniforme di resina e di vuoti. Da pezzo a pezzo quindi, anche se di geometria ragionevolmente uguale, possono presentarsi grandi differenze di prestazioni meccaniche, il che limita di solito l'utilizzo di parti in RTM ad applicazioni semistrutturali quali pannellature.

Una buona ripetibilità del processo può essere raggiunta solamente dopo un'ampia messa a punto dei parametri di iniezione, quali numero e posizione dei punti di iniezione, legge di andamento della pressione di iniezione, tempo e temperatura del ciclo di cura, che è giustificabile solamente per lotti produttivi medio-alti.

2.4.8 Vincoli di forma

I principali vincoli di forma che rendono i processi di injection molding leggermente inferiori rispetto a quelli di manual prepreg lay-up sono quelli legati alla necessità di estrazione delle parti dagli stampi, e quindi i vincoli di angoli di sforno.

Le tecniche di resin-film infusion o vacuum-infusion possono essere felicemente usate nella realizzazione di strutture di ampie dimensioni con forme semplici quali pannelli e profili aerodinamici.

In injection molding è possibile poi realizzare spessori maggiori rispetto a quanto era possibile fare in manual prepreg lay-up.

Resa estetica

Per quel che riguarda l'RTM i componenti possono essere realizzati con entrambe le facce dello stampo di buona finitura, in modo da poter ottenere resa estetica su entrambe le facce del pezzo. Vacuum

infusion ovviamente presenterà solamente un lato con buona resa estetica. La natura stessa del processo non garantisce però rese di qualità comparabili con i processi che fanno uso di preimpregnati. Il fenomeno dell'impregnamento per iniezione non garantisce il riempimento completo degli spazi interfibra e questo può comportare la presenza di antiestetiche macroporosità sulla superficie della parte. Per questo motivo di solito componenti realizzati in injection molding vengono poi rivestiti di uno strato di trasparente e poi verniciati. Non è possibile ottenere l'effetto "Carbon Look" con superfici RTM in vista.

2.4.9 Conclusioni

I processi di injection molding si prestano in modo ottimale nel settore automotive alla realizzazione in media serie di parti semistrutturali quali pannellature e profili aerodinamici. Ad alti investimenti di attrezzaggio e macchinari corrisponde una forte riduzione dei costi dei materiali in quanto vengono utilizzati rinforzi secchi, invece che costosi prepreg, con anche conseguente riduzione ed eliminazione di emissioni di VOC. Questo processo impone grande responsabilità nel garantire la qualità dei prodotti in quanto il controllo del processo di iniezione viene ad assumere un ruolo chiave nell'ottenimento delle specifiche prestazionali.

2.5 Vacuum Infusion

[1]

2.5.1 Introduzione

Vacuum Infusion è una tecnica di iniezione di resina e può essere considerata derivante dal resin transfer molding (RTM). Una tecnica ad iniezione di resina generalmente consiste dei seguenti step produttivi:

- Il rinforzo secco è piazzato nello stampo
- Lo stampo è chiuso
- La resina fluisce attraverso lo stampo e impregna il rinforzo
- Cura della resina
- Lo stampo è aperto ed il prodotto estratto

Un modo per distinguere tra le differenti tecniche di iniezione di resina è come il gradiente di pressione è applicato per spingere la resina a fluire all'interno dello stampo. Nel caso del vacuum infusion il gradiente di pressione è generato dal vuoto creato alla porta di uscita. Il serbatoio della resina all'ingresso è a pressione ambiente, contrariamente alle resine per iniezione di resina (quale l'RTM), in cui il serbatoio della resina è pressurizzato. L'uso del vuoto come guida del fluire della resina ha avuto grande impatto sulle applicazioni tecniche e negli attuali dibattiti su tali processi. Il grande vantaggio dell'uso del vuoto è l'assenza di grandi forze nello stampo. L'RTM standard

richiede l'utilizzo di tooling resistenti e rigidi. Più grande è il pezzo, più difficoltoso e costoso diventa. Questo è il motivo per cui il primo grande successo della vacuum infusion fu nella produzione di pezzi di grandi dimensioni in piccole quantità. Il maggior svantaggio dell'uso del vacuum infusion è la sensibilità alle perdite. Una perdita causata da una non perfetta tenuta dell'ermeticità dello stampo comporterà il fluire di aria dentro lo stampo. Questo spesso comporta la presenza di aree ricche di sacche d'aria nelle parti sottoposte a cura. Nell'RTM una non perfetta ermeticità dello stampo comporterà semplicemente un piccolo spillamento di resina.

Questa tecnologia fu sviluppata negli anni '70 e '80 come alternativa ai processi a stampo aperto quali l'hand lay-up e spray-up. Vacuum infusion era considerata una alternativa low-cost. Infatti con poche modifiche gli stampi usati per l'hand lay-up e spray-up potevano essere anche usati per la vacuum infusion.

Vacuum infusion è in uso dagli anni '60 e nei 20 anni successivi enormi sviluppi del processo produttivo sono maturati, risultando in un grande numero di differenti processi dai nomi esotici descritti in letteratura. Molto spesso le informazioni circa gli sviluppi facevano molta attenzione alle piccole differenze tra le varie tecniche designando i nuovi processi con abbreviazioni particolari, quali VARI (vacuum assisted resin injection), BLIP (bladder infusion process), SCRIMP (Seeman composite resin infusion molding process) e altri.

2.5.2 Caratteristiche tecniche

2.5.3 Possibilità e limiti del vacuum infusion:

GEOMETRIA: in teoria non ci sono limitazioni geometriche per il vacuum infusion. Sono realizzabili curve tridimensionali, strutture a guscio e parti cave. Ma la fattibilità e l'accessibilità nel posizionare il rinforzo secco nello stampo è il criterio più importante nel decidere sulla realizzabilità economica della parte. Dettagli nella geometria che possono causare problemi sono:

- Spigoli acuti nella parte possono disturbare il modello di flusso della resina
- Anche variazioni di spessori possono disturbare il modello di flusso della resina. In ogni modo il maggior problema sta nel resin system. Una buona cura delle parti sottili può spesso risultare in temperature troppo elevate nelle parti spesse. Lo spessore non è di per sé un problema se il resin system è stato scelto accuratamente. Con vacuum infusion sono stati realizzati laminati di spessore dal millimetro ai 100 mm.

DIMENSIONI DEL COMPONENTE: la realizzazione con successo di parti molto grandi in vacuum infusion è una questione più di abilità artigianale e coraggio che di sviluppo della tecnologia. Sono state realizzate parti dalla superficie di 100 m². Le limitazioni sono correlate ad un problema pratico: l'accessibilità della parte (prima e durante l'iniezione). Inoltre maggiori sono le dimensioni della parte maggiore è la probabilità che qualcosa vada storto. In generale, per giustificare il grande rischio che si corre, si evidenziano chiari vantaggi nella realizzazione di componenti in pezzi unici rispetto all'assemblaggio di due o più parti.

INTEGRAZIONE DI PARTI: (materiali al nucleo ed inserti metallici): similmente ad altre tecniche di iniezione, e a tecniche quali l'hand lay-up e al prepregging, il vacuum infusion può sostenere l'applicazione di vari tipi di nuclei ed inserti. Generalmente nuclei a nido d'ape non sono applicati nella vacuum infusion, anche se i pannelli a nido d'ape possono essere coperti con fogli sigillanti per evitare la penetrazione della resina nelle cavità. I nuclei devono essere realizzati in materiali a celle chiuse, ma spesso questo può comportare la presenza di zone ricche di vuoti rischiose dal punto di vista del collasso strutturale.

CONTENUTO DI FIBRE: due aspetti determinano il contenuto in fibre della parte: il rinforzo di fibra usato e la pressione applicata. Questo è il motivo per cui possono essere realizzati pezzi con un ampio range di contenuto in fibre (15-65% in volume).

FINITURA SUPERFICIALE: il sistema di stampaggio e la combinazione di rinforzo e resina determina la qualità di finitura superficiale della parte. In generale è facilmente ottenibile una buona qualità superficiale su di una faccia della parte.

TOLLERANZE E FEDELTA' ALLA FORMA DELLO STAMPO: in vacuum molding è difficile la perfetta ricalcatura della forma dello stampo. Generalmente i bordi necessitano di essere rifiniti. Inoltre il lato della parte che si affacciava al foglio può presentare sbavature di resina portate dalle increspature del foglio stesso. In alcuni casi queste sbavature devono essere rimosse con carteggiatura. Ovviamente tolleranze migliori possono essere raggiunte con l'utilizzo di stampi rigidi e, se richiesto, con l'utilizzo di speciali tooling nelle zone di più critica realizzazione.

Vantaggi:

Il vacuum infusion è stato sviluppato come una tecnologia a basso costo capace di competere sui costi con spray-up ed hand lay-up avendo però numerosi vantaggi. Il maggiore, motivo della grande spinta nello sviluppo del processo è l'eliminazione delle emissioni di stirene, combinata con la possibilità di lavorare con un semplice sistema di stampaggio (solo uno stampo rigido, come per hand lay-up e spray-up). Questo comporta un miglioramento delle condizioni interne ed esterne nella tecnica dello stampo aperto. Altri vantaggi sono:

- Miglioramento della qualità del laminato (miglior impregnazione e maggior contenuto in volume di fibre)
- Maggior robustezza delle proprietà del prodotto (le proprietà sono meno dipendenti dalla abilità dell'operatore) Questo comporta il poter prevedere nella progettazione un numero minore di ausili all'operatore per la fabbricazione manuale, il che risulta in una progettazione più efficiente.
- Minor uso di materiali (in confronto all'hand lay-up e spray-up, meno resina è usata e meno sporchi saranno i bordi del prodotto)

Svantaggi:

Quando un'azienda decide di realizzare il vacuum infusion, deve considerare che questa tecnica può porre condizioni nel progetto della parte, condizioni nel processo e necessità di formazione degli

operatori. Altri svantaggi della tecnologia sono:

- Sensibilità alle perdite per non ermeticità dello stampo, il che rende il processo critico per l'eventuale presenza di difetti
- E' difficile realizzare una buona finitura superficiale, specialmente in presenza di forti variazioni di spessore. Quando la intera parte viene sottoposta a cura in un solo trattamento, possono risultare alti picchi di temperatura causata dalle reazioni esotermiche e importanti fenomeni di ritiro da cura.
- Il peggiore: molti materiali ausiliari sono utilizzabili una sola volta (fogli, nastri sigillanti, tubazioni, manicotti, valvole) e gettate dopo l'estrazione dallo stampo.

2.5.4 Applicazioni

Le maggiori applicazioni di vacuum infusion si ritrovano nell'industria navale rivolta più che altro a ridurre le emissioni di stirene rispetto alle tecnologie di produzione a stampo aperto di hand lay-up e spray-up.

Nel settore dei trasporti per molti anni la produzione di pannelli strutturali realizzati in vacuum infusion si è limitata alle piccole medie quantità. Il basso costo dei macchinari e attrezzature specifiche ha reso questo processo molto più economico della realizzazione di stampi in acciaio per produzioni in piccola serie. Generalmente il lay-up di pannelli strutturali consiste in una prima distesa di gelcoat seguito da diversi strati di rinforzi in fibra altamente permeabili e nuclei. Il gelcoat, il rinforzo secco e i nuclei sono applicati manualmente nello stampo femmina in fibra di vetro. Il controstampo generalmente consiste in un guscio flessibile in fibra di vetro. Una piccola macchina per l'iniezione è comunemente usata per automatizzare il mescolamento delle componenti della resina. Il dispositivo di iniezione accorcia anche i tempi di ciclo realizzando una pressurizzazione della bocca di ingresso. Pannelli strutturali sono realizzati anche in hand lay-up e spray-up, ma vacuum infusion presenta numerosi vantaggi rispetto a questi processi. Il più importante è la maggior pulizia del processo, la conseguente maggiore qualità, migliori proprietà del laminato, e minori tempi di ciclo per la maggiorparte delle applicazioni.

2.5.5 Descrizione tecnica della realizzazione della parte

Il vacuum infusion è una tecnologia versatile. Prima di iniziare la produzione di una parte, è opportuno determinare preliminarmente le modalità con cui la parte verrà realizzata. Si deve considerare l'utilizzo del vacuum infusion come una opzione tra molte in quanto per la realizzazione dello stesso pezzo sono utilizzabili più tecnologie. In una situazione ideale, si dovrebbe realizzare una base di dati comprendente la lista di specifiche che il pezzo dovrà soddisfare per un approccio concorrenziale nella scelta tra le varie tecnologie disponibili.

Injection test:

Dal momento che il vacuum infusion è stata scelta come tecnologia manifatturiera per la parte, è opportuno che vengano realizzate le seguenti verifiche:

- *Test di iniezione su piccola scala (pannelli piatti)*: in modo da valutare le prestazioni sia del rinforzo (maneggiabilità, permeabilità) sia della resina (maneggiabilità, viscosità, impregnabilità del rinforzo, cura), può essere svolto un semplice test di iniezione su di un piccolo pannello rettangolare. Questo realizza uno screening iniziale del materiale

- *Test di iniezione semplificato in vera scala*: sezioni dal previsto comportamento critico possono essere investigate con test di iniezione usando attrezzature relativamente semplici in scala 1:1 o 1:2. Per esempio un cambiamento di sezione nella parte può essere investigato con un test di iniezione su di un pannello piatto. Lo stesso può essere fatto con un inserto o una nervatura. Un angolo o uno spigolo possono essere investigate usando una semplice ansa di alluminio

- *Test di iniezione in vera scala sulle vere sezioni*: infine può essere realizzata una vera sezione in scala 1:1. Questa simulazione finale permette una regolazione fine del processo e l'eliminazione di possibili errori.

Ai test di iniezione può essere vantaggiosamente affiancata una simulazione dell'avanzamento del fronte di iniezione.

Applicazione del gelcoat e/o primo strato:

Dipendentemente dalle dimensioni e dalle specifiche che deve verificare la parte può essere applicato il gelcoat. Il gelcoat non deve essere applicato sulle parti dello stampo che andranno a fare tenuta. Per prima cosa, viene applicato manualmente un primo strato sulla pellicola di gelcoat. Questo strato può essere applicato o per garantire migliori proprietà di durata (usando anche additivi per la resina) o per proteggere lo strato di gelcoat durante il lay-up del rinforzo secco e per garantire buona adesione tra il laminato ed il gelcoat. Molti di questi richiedono diversi giorni o settimane per l'inserimento di tutto il rinforzo nello stampo. Senza lo strato deposto in hand lay-up il gelcoat potrebbe danneggiarsi e l'adesione essere povera.

Posizionamento del rinforzo secco e anime nello stampo:

Il rinforzo secco e le anime (se usate) vengono posizionati nello stampo. Per piccole parti, il rinforzo può essere preformato per velocizzare il tempo di ciclo (come nell'RTM). Per parti di grandi dimensioni, il rinforzo (qualche volta pretagliato) è posizionato nello stampo ed assicurato (se richiesto). Assicurare il rinforzo e le anime nella posizione appropriata può essere difficile, specialmente con geometrie complesse e superfici verticali. Per assicurare il rinforzo vengono utilizzati tre metodi:

- Morsetti e ganci temporanei (saranno rimossi dalla parte prima o dopo l'infusione)
- Ganci meccanici permanenti, quali graffette (che rimarranno nella parte)
- Adesivi, quali giunzioni termoplastiche, o colla

Un sistema di fissaggio permanente può influenzare le proprietà del laminato.

Posizionamento dei canali e degli strati distributori di flusso:

Quando è utilizzato uno strato di flusso al di sopra del rinforzo, questo strato è di solito posizionato sul rinforzo con l'interposizione di un foglio separatore (peel ply). Questo permette la rimozione dello strato distributore dopo l'infusione e la cura della resina. In base alla strategia di iniezione vengono posizionati i canali (di solito spirali di plastica o metalliche) e/o gli strati distributori di resina. Per poter essere rimossi i canali distributori sono usualmente avvolti in un peel ply.

Posizionamento delle porte di uscita:

La posizione delle porte di uscita dipende dalla strategia di iniezione. Si possono distinguere due soluzioni:

- Sulla sommità della parte
- In alcuni casi nella parte centrale della parte (non sulla sommità)

Quando la porta di uscita viene posizionata sulla sommità il suo posizionamento è molto semplice.

Chiusura dello stampo:

La metodologia di chiusura dello stampo dipende dal tipo di stampo. Quando è utilizzato un guscio plastico flessibile con rinforzo in fibra di vetro, la guarnizione di chiusura ermetica è di solito integrata nello stampo. Una cava nello stampo per un o-ring in gomma o silicone è molto efficiente. Quando è usato un foglio, questo necessita di essere drappato sopra la parte e sigillato sullo stampo con nastri adesivi. Dal momento che gli ingressi indesiderati d'aria sono molto critici per il vacuum infusion, è di solito preferito l'utilizzo di una doppia chiusura ermetica con nastri adesivi. Uno strato distributore è posizionato nella cavità tra i due nastri sigillanti e nella cavità è fatto il vuoto, in modo da assicurare l'assenza di perdite in ingresso d'aria (Fig. 2.15).

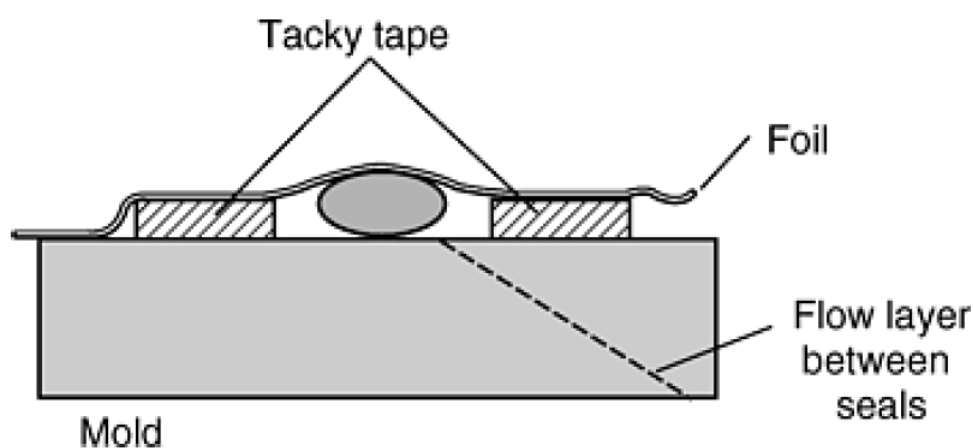


Figura 2.15: Assenza di perdite in ingresso d'aria

Il drappaggio del foglio è un passaggio critico. Il foglio deve essere grande abbastanza per seguire la geometria e ricoprire completamente la parte. Quando la parte è complessa, questo comporta la

presenza di pieghe nel foglio. Queste pieghe necessitano di essere adeguatamente sigillate anch'esse (Fig. 2.16).

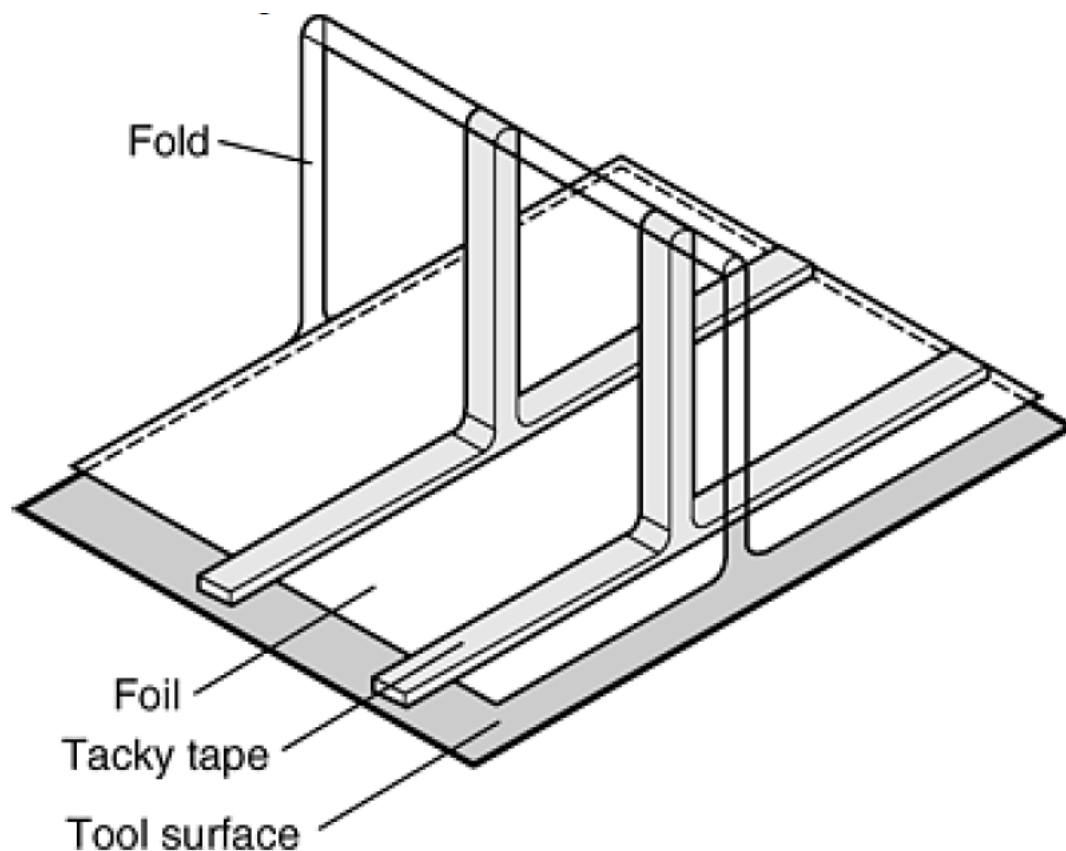


Figura 2.16: Pieghe sigillate

Applicazione del vuoto e test per le perdite d'aria (leakage):

Quando lo stampo è chiuso la cavità può essere evacuata. Ovviamente l'ammissione della resina deve essere chiusa. Se è usata una doppia sigillatura, la cavità tra le chiusure ermetiche è evacuata per prima. La pressione (livello di vuoto) nella cavità e le perdite d'aria devono essere monitorate. Alcune aziende ritengono che la sola misura della pressione sia sufficiente a verificare il raggiungimento di un certo livello di vuoto che faccia ritenere la tenuta delle guarnizioni accettabile. Altre aziende utilizzano un sistema semplice e molto efficiente per controllare il tasso di leakage: la manichetta alla pompa viene chiusa e viene misurata la variazione di pressione (dopo 1,2 minuti ecc.). Questo risulta in un tasso di leakage di x mbar al minuto, il quale è una buona unità di misura per decidere sull'accettabilità del processo. Per la cavità tra le chiusure ermetiche un leak rate di 100 o 200 Pa al minuto è di solito considerato accettabile. Superato questo test la cavità nello stampo può essere evacuata. Quando è usato un semistampo in fibra di vetro si apre la valvola connessa alla pompa di vuoto e si aspetta finché non si è creato il giusto tasso di vuoto prima di iniettare. Quando è utilizzato un foglio, è necessario prima rimuovere gli eccessi d'aria.

Preparazione della resina:

La resina per l'infusione deve essere mantenuta almeno 24 ore nell'ambiente di lavoro per portarsi alla sua stessa temperatura. Solo dopo che il leak rate è considerato accettabile i componenti della resina possono essere miscelati. Il mescolamento deve essere eseguito con cura in modo da prevenire l'inclusione di aria in eccesso (che potrebbero formare delle bolle d'aria nella parte). La resina può essere degassata prima e dopo il mescolamento, dipendentemente dagli utilizzi. Il degassaggio può avere effetti sul trattamento di cura. Monitorare la temperatura della resina, la viscosità, il tempo di gel è buona abitudine per prevenire errori, specialmente per pezzi dalle ampie dimensioni.

Infusione della resina:

Eseguite le suddette procedure può avere inizio l'infusione. Secondo il metodo più semplice, un manicotto è posizionato nel contenitore della resina, ne viene aperta la valvola e la resina fluisce nello stampo. Durante l'infusione il processo va monitorato.

Termine dell'infusione:

Se la resina ha riempito l'intera cavità dello stampo, ciò non significa che il processo di infusione sia concluso. Il contenuto di vuoti, gli spessori, le tolleranze ed il contenuto in fibre della parte sono influenzati da come l'infusione viene conclusa. Le quattro possibilità di interesse sono:

1. Chiusura dell'immissione
2. Chiusura della porta d'uscita
3. Chiusura di entrambi: immissione ed uscita
4. Incremento della pressione all'uscita e susseguente chiusura dell'immissione

Se l'uscita è chiusa per prima, la pressione nell'intero stampo decresce fino a raggiungere la pressione di infusione. L'eccesso di resina fluirà verso l'uscita e lo spessore della parte si ridurrà, portando ad un elevato ed omogeneo contenuto di fibra. Ma d'altro canto le bolle d'aria presenti nella parte aumenteranno in dimensione, e questo fenomeno sarà più rilevante nelle zone vicino all'ammissione nella misura in cui il salto di pressione sarà maggiore vicino all'ammissione che verso l'uscita. Se l'uscita è chiusa per prima, la pressione nell'intero stampo aumenterà fino alla pressione atmosferica. Questo causerà una diminuzione delle dimensioni delle bolle d'aria, lo spessore della parte aumenterà lentamente seguendo il rilassamento del rinforzo, risultando in un laminato con un basso contenuto di fibre.

Chiudendo entrambi ingresso e uscita nello stesso tempo questo risulterà in un equilibrio di pressioni solitamente tra la pressione atmosferica all'ingresso e la pressione di iniezione all'uscita. Questa è una buona metodologia di conclusione dell'infusione. Se il tasso di leakage fosse però molto alto si mostra ancora più conveniente l'opzione quattro. La pressione all'uscita è inizialmente aumentata

(da 10 a 40 Kpa). Poi l'immissione è chiusa. Questo risulterà in un equilibrio delle pressione, come mostrato nella linea 4 di figura, ed in presenza di ingressi d'aria indesiderati rimarrà un piccolo gradiente di pressione. In un processo ottimizzato l'immissione verrà chiusa prima che lo stampo sia completamente pieno. Se correttamente eseguito, l'eccesso di resina presente nello stampo fluirà verso l'uscita durante il processo di equalizzazione e completerà l'infusione con un minimo spillamento attraverso l'uscita.

2.5.6 Proprietà rappresentative del componente

Proprietà meccaniche del componente:

Le proprietà meccaniche di un componente in materiale composito sono principalmente determinate dal rinforzo in fibra (orientamento, frazione in volume di fibre) e, per alcune proprietà, dalla matrice polimerica. In generale, questo implica che le proprietà meccaniche di un componente realizzato con una specifica tecnologia manifatturiera sono funzione del rinforzo che può essere usato e della frazione in volume di fibre che può essere garantita.

La Tab. 2.3 mostra il range di frazione in volume di fibre che può essere ottenuta con diverse tecnologie produttive e tipi di rinforzo in fibra di vetro. Possono essere distinti tre tipi di rinforzo:

- Random mat: chopped-strand mat e continuous-strand mat, oltre agli spray-up roving
- Woven roving e tessuti woven
- Rinforzi monodirezionali (UD): rovings e nastri, inclusi anche i multiassiali; strati UD fitti in differenti orientazioni

Manufacturing technique	Fiber volume fractions (V_f), %					
	Random mat		Woven roving		Unidirectional and multiaxial	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Spray-up	10	20	...	...	...	...
Hand lay-up	10	20	25	40	40	50
Vacuum infusion	20	30	40	50	50	65
Resin transfer molding	20	30	40	50	50	65
Prepreg compression molding	...	...	40	55	50	70
Filament winding	...	...	...	...	50	70
Pultrusion	20	30	40	55	50	70

Tabella 2.3: Range di frazione in volume di fibre

In Tab. 2.3 sono date le proprietà meccaniche per tre tipi differenti di rinforzo in fibra di vetro, per comuni range di frazione in volume di fibre (V_f):

- Random mat (da 10 a 30% V_f)
- Woven roving (con un bilanciamento 0/90, da 30 a 50% V_f)
- UD (da 40 a 70% V_f)

I valori delle proprietà meccaniche date in Tab. 2.4 sono ricavate da dati in letteratura.

	Random mat			Woven roving (balanced)			Unidirectional			
Fiber volume fraction (V_f), %	10	20	30	30	40	50	40	50	60	70
E_1 , GPa	4.8	8.4	12.0	13	18	24	31	37	43	49
E_2 , GPa	4.8	8.4	12.0	13	18	24	9	10	12	13
G_{12} , GPa	2.5	2.5	2.5	3.3	3.3	3.3	3.4	4.2	4.9	5.6
ν_{12} , GPa	0.33	0.33	0.33	0.19	0.19	0.19	0.29	0.28	0.28	0.27

Tabella 2.4: Valori delle proprietà meccaniche ricavate da dati in letteratura

Influenza della produzione sulle proprietà:

La influenza maggiore che la tecnica di produzione ha sulle proprietà meccaniche è in relazione con la frazione in volume di fibre che può essere realizzata. Tecniche produttive che risultano in frazioni in volume di fibre simili garantiscono simili proprietà meccaniche. In ogni modo, proprietà strettamente dipendenti dalla matrice, quali resistenza al taglio interlaminare, che possono essere influenzate pesantemente dal processo produttivo e dalla qualità con cui il pezzo è stato realizzato, sono attualmente oggetto di studi.

Vengono ora discussi due importanti parametri produttivi della vacuum infusion: l'influenza delle condizioni del processo sul trattamento di cura e sulle proprietà meccaniche e l'influenza dei materiali aderenti al rinforzo sulle proprietà meccaniche.

Influenza delle condizioni del processo sul trattamento di cura e sulle proprietà meccaniche.

Come ogni tecnologia manifatturiera che fa uso di resine termoindurenti, la temperatura ed il grado relativo di umidità possono influenzare il trattamento di cura della resina. In ogni modo, si è dimostrato che anche l'assorbimento dei componenti della resina e/o il desorbimento dei componenti del rinforzo (es. sizing) o del materiale del nucleo (es. assorbimento di acqua) influenza il trattamento di cura della resina. Questo può essere verificato osservando la differenza tra il tempo di gel nello

stampo e nel serbatoi di iniezione. Il gel time nello stampo può essere molto più breve o molto più lungo.

Influenza dei materiali aderenti al rinforzo sulle proprietà meccaniche: nel processo di vacuum infusion vengono utilizzati rinforzi allo stato secco. Quando la parte è complessa o presenta superfici verticali, non è sempre semplice mantenere la posizione del rinforzo nello stampo finché lo stampo è chiuso ed il vuoto applicato. Uno dei metodi per mantenere il rinforzo posizionato è mediante l'uso di adesivi. Questi necessitano di essere utilizzati con cautela perché non sono ancora noti gli effetti a breve e lungo termine della loro presenza sulle proprietà del laminato. Studi hanno dimostrato gli effetti negativi che l'uso di adesivi ha avuto sulla resistenza a taglio interlaminare.

2.5.7 Osservazioni

Il vacuum infusion è considerata una tecnologia non ancora completamente matura. Le ricerche compiute negli anni '80 hanno accelerato notevolmente l'applicazione di questa tecnologia. In queste applicazioni, a volte, si sono evidenziate difficoltà e criticità di questa tecnologia ed hanno dimostrato la necessità di ulteriori ricerche e sviluppi. I due più importanti settori di ricerca e sviluppo sono:

- Sviluppo dei materiali
- Attrezzature di processo e controllo dello stesso

L'applicazione con successo della vacuum infusion e le caratteristiche meccaniche raggiunto dai materiali (alte frazioni in volume di fibre e piccole concentrazioni di vuoto) hanno innescato l'attenzione dell'industria aerospaziale.

2.6 Filament Winding

[1]

2.6.1 Introduzione

Il filament winding è un processo nel quale i rinforzi di tipo continuo (filamenti, wire, yarn, tape o altro), sia precedentemente impregnati con resine matrice, sia impregnati durante l'avvolgimento, sono sistemati su di un mandrino ruotante in modo predefinito, dando origine ad una struttura in grado di sopportare determinati stati tensionali. Una volta applicato il numero prescritto di strati, il materiale che ha subito l'avvolgimento viene sottoposto a curing ed il mandrino può essere rimosso o lasciato come parte della struttura. Alta velocità e preciso lay-down di fibre a struttura continua in modelli predefiniti costituiscono le basi del filament winding. Il macchinario per il filament winding in figura 2.17 sposta avanti e indietro la testa di avvolgimento a velocità sincronizzata con la rotazione del mandrino, controllando l'angolo di avvolgimento del rinforzo e il grado di lay-down delle fibre. La deposizione può essere controllata sia da computer (CNC) sia semplicemente in modo meccanico dagli operatori; questa seconda possibilità è meno conveniente, ma richiede minori investimenti in

capitale. Normalmente, le apparecchiature meccaniche sono limitate a tre assi o meno mentre i sistemi CNC possono accogliere fino a sette assi.

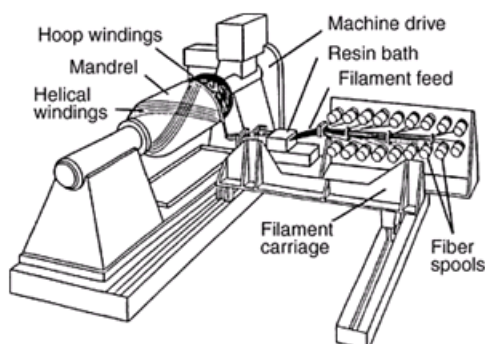


Figura 2.17: Tipica macchina per Filament-Winding

Resine termoindurenti, generalmente usate come leganti per rinforzi, possono essere applicate ai roving asciutti al momento dell'avvolgimento, e questo viene definito wet-winding. Esse possono venire anche applicate prima dell'avvolgimento come tow o tape prepreg da usare prontamente o da refrigerare. Normalmente il curing del composito in filament-winding viene realizzato ad elevate temperature senza vacuum bagging o compattamento in autoclave. La rimozione del mandrino, la rifilatura ed altre operazioni di finitura completano il processo.

Alcune applicazioni tra cui quelle aerospaziali generalmente utilizzano fibre non ritorte; in molte applicazioni commerciali la torcitura viene utilizzata dai costruttori di compositi quando la fibra non tesa viene fornita tirandola da un contenitore centrale.

Il mandrino può avere forma cilindrica, sferica o qualunque altra forma purché non presenti concavità, sebbene alcuni costruttori siano stati in grado di includere concavità complesse in strutture con la tecnica del filament winding (Figure 2.18).

Strutture con pareti grosse o sottili, in particolare strutture di rotazione come camere di pistoni o condotti a pressione vengono più facilmente realizzate col filament winding.

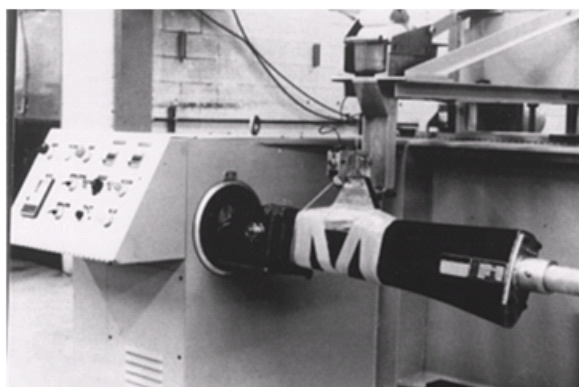


Figura 2.18: Configurazione complessa di winding per il V22 grip assembly

Il rinforzo può essere avvolto in strisce adiacenti o in strisce che si ripetono a gradini lungo la larghezza della banda fino a coprire eventualmente la superficie del mandrino. La tecnica di processo

assomiglia alquanto a quella mostrata nella Figura 2.19 e può essere modificata sia con le attrezzature CNC sia con quelle meccaniche di filament-winding per ottenere molti differenti modelli di avvolgimento (ad es. polare, ad elica o a cerchio). La tecnica può variare tensione di avvolgimento, materiale di rinforzo, angolo di avvolgimento o contenuto in resina (se si tratta di avvolgimento umido) in ogni strato finché si è ottenuto lo spessore e il contenuto in resina desiderato con la orientazione richiesta. Molti componenti compositi possono essere costruiti simultaneamente con la stessa attrezzatura, con accurati angoli di avvolgimento delle fibre e con un buon controllo della resina.

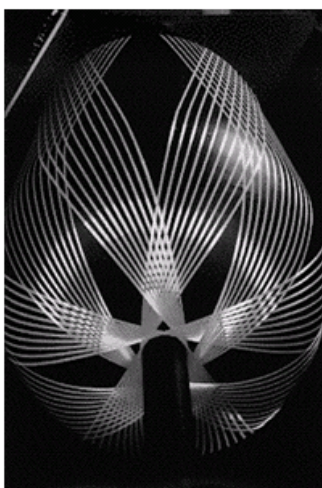


Figura 2.19: Visione finale di un filament winding multipass a singola matassa

L'industria dei filament winding, i processi di costruzione, le macchine e i materiali in matasse hanno subito drastici cambiamenti nel corso del tempo. Sono emersi molti nuovi costruttori in settori principalmente commerciali e di articoli sportivi, e l'attenzione si è spostata dal filament winding dei motori a razzo a quella delle mazze da golf, degli alberi di trasmissione, dei montanti delle trivelle.

Alcuni dei progressi recenti nel filament winding includono:

- L'uso di matasse di fibre prepreg invece della impregnazione di fibre secche. Il passaggio al prepreg è stato favorito dalla riduzione dei costi delle fibre (e del risultante prepreg), dalla necessità di una minima o di nessuna ripulitura (che da molto tempo costituisce un problema per il filament winding umido), dal ridotto impatto ambientale e dalla maggiore velocità di avvolgimento (nessuna imbracatura per la resina, nessuna aerazione della resina nel bagno di impregnazione)
- Aumentata resistenza e modulo elastico delle fibre, specialmente per le fibre di carbonio-grafite, nei confronti di quelle che erano disponibili negli anni '80
- Disponibilità di fibre in matasse di grandi dimensioni, la qual cosa rende il costo reale del processo economicamente più conveniente aumentando la velocità della deposizione delle fibre
- L'evoluzione di nuovi sistemi di resine per filament winding umido e la aumentata disponibilità di resine formulate con un terzo componente

- L'evoluzione di più convenienti towpregs, che ha reso il loro costo reale conveniente per molte applicazioni se comparato coi sistemi di resine wet-winding
- Lo sviluppo di sistemi di resine umide a bassa viscosità per resin transfer molding (RTM) e il loro conseguente adattamento per l'uso nel filament winding
- Miglioramenti nelle macchine per filament winding e per i controlli. Sono disponibili movimenti a sei assi e la maggior parte delle macchine CNC reclamizzano programmi di facile gestione. I movimenti di avvolgimento possono ora essere programmati off-line molto più facilmente e più rapidamente, il che comporta adattamenti e modificazioni della stratificazione a costi effettivi più convenienti.

2.6.2 Vantaggi e svantaggi

Vantaggi

Il vantaggio più importante del filament winding è il suo basso costo che è minore del costo del prepreg per molti compositi. La riduzione dei costi è possibile nel filament winding poiché una fibra relativamente costosa può essere combinata con una resina non costosa per produrre un composito complessivamente relativamente non costoso.

Inoltre, tale riduzione di costo proviene dalla alta velocità di lay-down delle fibre.

Altri vantaggi del filament winding comparati con altri processi di curing e di compattamento sono:

- Sistemazione altamente ripetibile ed accurata delle fibre (da parte a parte e da strato a strato). L'accuratezza può essere superiore a quella realizzata dalle macchine per sistemazione delle fibre o per tape-laying automatizzato.
- La capacità di usare fibre continue su tutta l'intera area del componente (senza giunte) e di orientare facilmente le fibre nelle direzione del carico. Questo semplifica la fabbricazione di strutture come le fusoliere di velivoli e riduce il numero di giunzioni da cui una maggiore affidabilità e costi inferiori.
- Eliminazione della spesa in capitale (e delle restrizioni di dimensione) legate all'uso di un'autoclave e delle spese ricorrenti per il gas inerte. Possono essere costruite strutture a pareti spesse più grandi di quelle che un autoclave può accogliere.
- Capacità di produrre un composito con un alto volume di fibre.
- I costi del mandrino possono essere più bassi dei costi di altri tipi di lavorazione perché normalmente c'è un solo strumento, il mandrino maschio, che regola il diametro interno e rifinisce la superficie interna.

- Costi inferiori per un grande numero di componenti perché può occorrere meno manodopera che per molti altri processi. E' possibile realizzare con filament winding molti piccoli componenti, come ad es. fino a 20 mazze da golf nello stesso tempo realizzando una netta riduzione dei costi paragonati a quelli dell'arrotolamento a bandiera. Vengono eliminati i costi per l'insaccamento e per lo smontaggio dei materiali insaccati nonché i costi periodici di questi materiali.
- I costi sono relativamente più bassi per i materiali dato che fibre e resina possono essere usate nella forma a più basso costo piuttosto che come prepreg.

Svantaggi del filament-winding

Tali svantaggi includono:

- Necessità del mandrino che può essere complesso o costoso.
- Necessità di una forma del componente che permetta la rimozione del mandrino. Mandrini lunghi, tubulari generalmente non presentano assottigliamento. A meno che le forme non uniformi possano venire meccanicamente disassemblate, i mandrini devono essere costruiti in materiale solubile e fragile. Differenti materiali per mandrini, a causa della differente dilatazione termica e delle differenti percentuali di plies circolari versus plies elicoidali nei materiali compositi e nei laminati realizzati con lay-up, presenteranno vari gradi di difficoltà nella rimozione della parte dal mandrino stesso.
- Difficoltà nell'avvolgimento di concavità.
- Impossibilità di cambiare facilmente il percorso della fibra (in una lamina).
- Scarsa finitura della superficie esterna, il che può ostacolare le caratteristiche aerodinamiche o estetiche.

E' importante notare che la maggior parte degli svantaggi sono costituiti da applicazioni non specifiche e, in molti casi, sono stati evitati da progetti innovativi e modifiche delle attrezzature. Alcuni fattori compensano gli svantaggi associati ai mandrini. Di solito il mandrino è meno costoso delle matrici e degli stampi per metodi di modellamento al di fuori della pultrusione e del RTM.

Materiali non costosi per il mandrino, come il cartone ed il legno, sono stati usati con successo. Costruttori di grandi motori a razzo continuano ad usare mandrini di sabbia solubile in acqua o mandrini di gesso che possono essere strappati, rimpiccioliti, fatti passare attraverso relativamente piccole aperture.

Sebbene generalmente le concavità non possano essere trattate con filament winding, sono disponibili tre opzioni per ovviare a questa restrizione. La prima implica l'avvolgimento della parte, colmando l'area concava, e poi installando una lamiera di pressa a piatto concavo ed applicando una pressione esterna durante il trattamento di curing. Questa tecnica può richiedere il dropping winding

a tensione o il taglio delle fibre nelle aree di scarto. Una variante di questa consiste nell'uso di una lamiera di pressa piatta che viene rimossa quando le strisce di fibre attraversano la depressione, viene sostituita immediatamente e viene tenuta fino a che la striscia passa al successivo giro. Questo metodo mantiene la disposizione e la tensione delle fibre ed elimina la necessità del taglio. Un secondo approccio consiste nell'avvolgere la forma esatta su un mandrino positivo con inserto fittizio, poi rimuovere l'inserto e sistemare la fibra. La terza opzione è di avvolgere una area a sezione ridotta scegliendo la curvatura iperboloide della rientranza associato ad un angolo spiraliforme della fibra.

Il percorso delle fibre non può essere cambiato facilmente, ma ciò può essere fatto usando perni, denti di sega, o facendo scivolare il tow.

2.6.3 Effetti della tensione delle fibre

Nel filament winding le fibre vengono posizionate sotto tensione. Questa tensione può essere vantaggiosa dato che le fibre in tensione hanno una resistenza due volte superiore a quella delle fibre in compressione. (Strutture in carbonio-grafite possono avere più fibre dal lato della compressione per compensare ciò. Le fibre vengono aggiunte dal lato della compressione avvolgendo a zero gradi e sono trattenute dagli avvolgimenti in eccesso). Comunque, se le fibre in un laminato non sono orientate, il laminato avrà valori di resistenza alla tensione e alla compressione ridotti. La resistenza a fatica ed altri fattori di performance strutturali vengono ridotti in presenza di fibre non orientate. Ciò significa che le fibre orientate in un laminato verranno caricate e cederanno prima che le fibre rilassate vengano completamente caricate. L'allineamento delle fibre è importante in modo particolare per le fibre ad alto modulo elastico come il carbonio-grafite a causa del loro caratteristico comportamento con bassa deformazione alla tensione. Un corretto uso della tensione delle fibre durante l'avvolgimento è l'unico modo per realizzare fibre orientate in una struttura filament wound. Poiché le fibre sono sotto tensione, esse possono muoversi o spostarsi quando la parte presenta estremità tagliate. E' possibile trattenere le fibre umide avvolgendole con fibre circonferenziali tensionate in ogni punto in cui le fibre terminano (come in una estremità tagliata o in un ply drop-off). Quando le fibre vengono tagliate fuori da queste posizioni, viene ridotta nella struttura la resistenza delle fibre con gli estremi a contatto, ma le fibre rimangono orientate e pronte ad assorbire in eguale misura la tensione e la compressione strutturale.

E' qualche volta vantaggioso avvolgere un anello esterno di vetro secco a tensione molto bassa per assorbire l'eccesso di resina, o il materiale aggiunto in successive operazioni al fine di evitare il taglio di fibre strutturali. L'effetto compressivo esercitato da strisce di fibre su fibre precedentemente avvolte, mentre i plies sono sistemati uno sull'altro, è quello di ridurre il diametro della struttura non trattata con curing. Il risultato di questo ridotto diametro è che le fibre precedentemente avvolte sono troppo lunghe per rimanere orientate e possono essere distorte, il che significa pieghettate. Pareti a medio e spesso avvolgimento devono essere realizzate ponendo particolare attenzione alla scelta della tensione per prevenire il pieghettamento. Fibre con più forte tensione vengono sistemate sui

plies interni. Dato che essi sono tirati, resistono ad un ulteriore compattamento. I plies successivi hanno una tensione gradualmente ridotta così da non comprimere i plies interni.

La tensione reale delle fibra è quella misurata mentre la fibra impregnata esce dall'occhiello di distribuzione (payout eye) alla stessa velocità in piedi per minuto usata durante l'avvolgimento del prodotto. (Ciò viene chiamato misura della tensione dinamica). La misurazione della tensione delle fibre alla rastrelliera non è accurata, anche se tutti i contatti di distribuzione tra la rastrelliera e la superficie di avvolgimento avvengono per mezzo di pulegge [49].

2.6.4 Modelli di avvolgimento

I tre modelli base di filament winding sono a elica, polare (o planare) e a cerchio (vedi Figura 2.20).

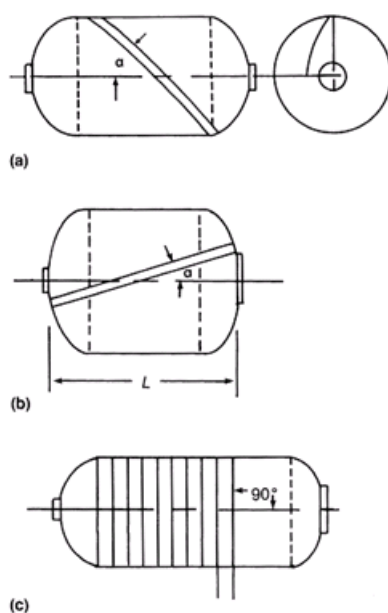


Figura 2.20: Modelli base di filament winding. (a) A elica. (b) Polare. (c) A cerchio.

Nell'avvolgimento *ad elica*, il mandrino ruota più o meno continuamente mentre il carrello che porta la fibra va avanti ed indietro ad una velocità regolata in modo da creare il desiderato angolo di avvolgimento ad elica. Il normale modello di avvolgimento fornisce giri multipli ad elica. Dopo il primo giro, le fibre applicate non possono essere adiacenti. Se risultano adiacenti, ciò viene chiamato modello ad un giro. Se sono richiesti tre giri per avere la striscia di fibre vicino alle fibre di inizio, si parla di modello a tre giri. Il modello ad elica è caratterizzato da incrociamenti di fibre in certi punti lungo il mandrino. La quantità di incrociamenti aumenta col numero di giri per modello. Uno strato consiste di un laminato con due plies ad angolo più o meno bilanciato. Le rivoluzioni del mandrino per giro variano con l'angolo di avvolgimento, con la larghezza della striscia, col fine sosta e con la lunghezza complessiva del recipiente.

L'avvolgimento di plies ad angolo, se effettuato con un programma a elica che non copre completamente la superficie del mandrino con ogni passaggio, si risolve in uno strato a two-ply in cui i due angoli sono sparpagliati.

Una tecnica con avvolgimento polare può applicare strati laminati in un modo simile, ma le fibre non vengono depositate su una superficie curva per l'estensione minore. Ciò può causare aumentata tendenza allo slittamento delle fibre con possibile riduzione finale della resistenza al carico.

Il vantaggio dell'avvolgimento ad elica è la maggiore versatilità. Quasi tutte le combinazioni di diametro e lunghezza possono essere avvolte bilanciando l'angolo di avvolgimento e i giri. Minori aggiustamenti possono essere ottenuti mediante cambiamenti della larghezza della striscia, dell'angolo di avvolgimento e della pausa.

Nell'avvolgimento *polare*, la fibra passa tangenzialmente alla apertura polare ad una estremità della camera, inverte la direzione e passa tangenzialmente dalla parte opposta della apertura polare all'altra estremità. Un modello ad un giro è connesso all'avvolgimento polare. Gli avvolgimenti vengono realizzati da un braccio che segue un ampio percorso circolare e il modello di lay-down è planare. Poiché il mandrino è regolato in modo da avanzare della larghezza di una striscia per ogni rotazione, successive striscie giaceranno adiacenti le une alle altre.

Il principale vantaggio del polar (o planar) winding è la sua semplicità. Non c'è nessuna inversione di spostamento e può essere mantenuta una velocità costante di avvolgimento. Comunque, dato che il percorso della fibra non è un elica, non è il percorso più breve della fibra tra diversi punti. Questo può portare ad uno scivolamento delle fibre durante il wet winding e a valori finali più bassi della pressione dei recipienti.

Sono anche conosciuti modelli a cerchio con avvolgimenti a 90° o circonferenziali (circ).

Parlando rigorosamente, l'hoop winding è un avvolgimento ad elica con un angolo ampio che si avvicina ai 90°. Ogni rotazione completa del mandrino fa avanzare il distributore della larghezza di una intera striscia. La macchina per l'avvolgimento è molto simile ad un tornio in cui la velocità del mandrino è molto maggiore della corsa del carrello. Hoop winding sono generalmente combinati con avvolgimenti longitudinali (helical o polar) per produrre una struttura con bilanciamento dello stress. Modelli di avvolgimento a cerchio vengono applicati alla sezione cilindrica di un tubo ad estremità chiusa, mentre modelli ad elica e polari rinforzano sia il cilindro sia le cupole.

Crossovers

Una delle maggiori differenze tra i compositi laminati in filament-wound e quelli prodotti con altri metodi è la presenza di incrociamenti. Quando una struttura è avvolta ad elica con strisce di fibre di una larghezza tale che attraversandola da una estremità all'altra, l'oggetto non viene coperto completamente, il risultato saranno gli incrociamenti. Modelli di filament winding ad elica piuttosto che di tipo polare, vengono scelti per tutte le strutture in cui il rapporto lunghezza/diametro è ≥ 2 , poiché ci si può aspettare che i modelli di avvolgimento polare scivolino durante la fabbricazione, quando vengono sottoposti a curing e quando sono sotto carico. La quantità di crossovers dipende dalla larghezza della striscia e dal numero di giri per modello. L'analisi del progetto del composito con crossovers è più complicata di quella per strati distinti.

Quando recipienti a pressione vengono caricati con incrementi molto alti (ad es. un passaggio in 10–20 microsecondi dalla pressione atmosferica a quella di scoppio) essi generalmente cedono

a livello dei crossover. Esistono prove secondo cui la resistenza ad uno sforzo ciclico viene ridotta leggermente quando vengono usati i crossovers. Quando gli strati vanno da 5 a 10 millesimi di pollice di spessore i valori sono molto vicini a quelli di strutture che hanno layers distinti. In alcune valutazioni, come nelle prove di resistenza a flessione su travetta, sembra che il numero di crossover possa aumentare l'apparente resistenza a flessione condizionando la modalità desiderata di cedimento. In piccoli tubi per il lancio di missili, i crossovers forniscono un beneficio addizionale.

Se essi si trovano nella superficie interna, possono impedire che le strisce e i tows si srotolino o si strappino da una estremità del tubo all'altra. Nelle parti che non hanno crossovers, ciò è probabile che avvenga, specialmente quando singole fibre non sono state completamente fissate alla matrice resinosa.

Anche un tubo avvolto con modalità elicoidale senza crossovers può cedere sotto uno stress di trazione per staccamento di fibre trasversali. Alcuni hanno consigliato un strato interno circolare per evitare questa modalità di rottura.

Poiché i due strati elicoidali che formano ogni angolo del ply sono intrecciati ai crossovers, esiste un certo grado di resistenza alla rottura almeno tra due plies ad angolo.

Strisce di tows possono conformarsi a forme estreme senza distorsioni o curvamenti o senza venire forzate o tese. Questo avviene perché ogni striscia in un tow può essere di qualunque lunghezza relativamente alle altre e può essere libera di scivolare, almeno nei sistemi wet-winding e in alcuni prepreg quando vengono riscaldati.

E' possibile nel filament winding che quando, per esempio, due strisce, si incrociano, lo spessore totale all'incrocio possa risultare minore del totale spessore delle due strisce, o minore dello spessore di una striscia, in funzione della possibilità di allungamento. Naturalmente la larghezza della striscia ai nodi sarà maggiore, in relazione alla riduzione in spessore. Questa tecnica può essere usata vantaggiosamente per costruire strutture di uso pratico come una isogriglia senza la necessità di un mandrino complesso scanalato e senza accumulo di fibre addizionali ai nodi.

2.6.5 Attrezzature ed equipaggiamento

Uno dei più grossi vantaggi del filament winding rispetto ad altri metodi di produzione di compositi è la semplicità di attrezzatura. Il mandrino, che presenta una accurata geometria interna, è generalmente il solo strumento di tipo speciale. Attrezzature e installazioni richieste sono di solito semplici e spesso sono costituite solamente da una macchina per l'avvolgimento e da un forno per il curing.

Il progetto del mandrino può essere semplice o complicato in base a quel che la parte richiede. I fattori che devono essere presi in considerazione sono: riutilizzabilità nel processo produttivo, tolleranze richieste, controllo della dilatazione termica, peso (limitazioni delle attrezzature), deformazioni (avvallamenti), rimozione della parte dal mandrino e il costo.

Materiali a basso costo per il mandrino come il cartone ed il legno possono spesso venire usati all'inizio della produzione del winding. All'altra estremità dello spettro di utilizzazione, dove parti critiche necessitano di tolleranze strette, può essere necessario usare costosi mandrini in acciaio

progettati per uso a lungo termine. Per alte temperature di curing (315° o 600°) risultano vantaggiosi mandrini di grafite con bassa dilatazione termica. I recipienti contenenti gas a pressione spesso richiedono fodere di metallo o plastiche poiché i compositi sono porosi ad alte temperature; le fodere di metallo possono anche servire da mandrini.

2.6.6 Tipi di mandrini

Descrizioni dei principali tipi di mandrini usati nell'industria del filament winding vengono riportate di seguito.

Mandrini solubili in acqua sono stati usati principalmente negli alloggiamenti dei motori a razzo e nei contenitori a pressione dove è richiesta la rimozione del mandrino attraverso piccole aperture.

La sabbia viene gettata dentro gli stampi femmina che usano componenti preassemblati come isolamenti, assi di turbine, tubi di illuminazione, flange polari.

La sabbia viene trattata e le due estremità del mandrino vengono assemblate e unite. I due sistemi di leganti comunemente usati sono il polivinil alcool ed il silicato di sodio. Il vantaggio del mandrino in sabbia solubile è il basso costo per produzioni di piccole quantità ed una eccellente riproducibilità dimensionale. Lo svantaggio è un costo iniziale alto nell'attrezzatura.

Mandrini a raggiera o di gesso sono spesso usati per fornire una superficie del mandrino ad alta tolleranza con materiali rimuovibili o collassabili. Il gesso viene trattato, poi ad esso viene sovrapposto un nastro di resina sintetica contenente fluoro o con alcuni altri film separatori. Terminato il curing, l'attrezzatura viene rimossa, il gesso viene frantumato o lavato via e il nastro di rilascio rimosso lasciando il desiderato profilo interno.

Il gesso supportato da metallo viene generalmente usato per parti relativamente grandi (da 3 a 6 m. o da 10 a 20 ft.) Per misure ancora maggiori il mandrino può essere limitato dalla coppia o dalla resistenza a compressione dei fissaggi degli assi di avvolgimento.

Mandrini segmentati collassabili sono strumenti costosi ad alta specializzazione ma i vantaggi della loro riutilizzabilità e del continuo processo di avvolgimento rendono la costosa attrezzatura utile per applicazioni ad alta produzione.

Mandrini cilindrici (tubulari) di acciaio vengono usati per fabbricare compositi che vengono spogliati (spinti o tirati) della superficie dopo il curing. Questi strumenti devono essere di alta qualità per un uso senza problemi. Superfici con ricopertura di cromo, anodizzate, o indurite e levigate rendono più facile la rimozione del mandrino. Una leggera conicità lungo la lunghezza del mandrino è anche utile. Il mandrino a tubo può essere complesso o semplice a seconda delle disponibilità economiche. La sua dimensione è limitata solamente dalla lunghezza del letto della macchina di avvolgimento.

Fodere di rinforzo non rimovibili nei recipienti a pressione realizzano contenitori a basso peso che uniscono l'alta resistenza rispetto alla densità dei compositi con un sottile, impermeabile involucro atto a contenere gas ad alta pressione come elio, idrogeno o ossigeno.

Fodere di rinforzo metalliche possono essere progettate per resistere a pressioni interne più o meno

grandi, ma in tutti i casi la fodera, che inizialmente serviva da mandrino per l'avvolgimento, diventa parte integrante del recipiente a pressione.

Mandrini per uso speciale includono mandrini di gomma gonfiabile (elastomerica) o plastica. Questi vengono limitati dalle proprietà esplosive del medium utilizzato per gonfiare. Una soluzione potrebbe essere quella di riempire il mandrino con un materiale come la sabbia e poi creare il vuoto su di esso.

2.6.7 Macchine per avvolgimento

Nella maggior parte delle macchine per avvolgimento, il mandrino è sospeso orizzontalmente tra un sostegno di testa ed uno di coda, come avviene nel tornio. Il carrello viaggia nel senso della lunghezza a velocità sincronizzate con la rotazione del mandrino per distribuire il roving da un occhio di avvolgimento a vari angoli di avvolgimento per particolari modelli di avvolgimento. C'è una grande varietà di attrezzature per il filament winding disponibili commercialmente per modelli di avvolgimento a elica, polari, a cerchio. La gran massa della produzione con filament winding è ancora realizzata usando le macchine meccaniche a trasmissione ad ingranaggi che si svilupparono negli ultimi anni 50. Queste macchine continueranno ad essere usate per il loro basso costo. Avvolgitori polari con solo due assi di rotazione (mandrino e braccio di avvolgimento) ancora producono alloggiamenti di motori a razzo e contenitori sferici a pressione in grande numero. Avvolgitori elicoidali sono progrediti e ora presentano meccanismi da due a sette assi (alcuni fornitori hanno promesso meccanismi a otto assi). Gli avvolgitori elicoidali possono essere sia orizzontali che verticali; questi ultimi possono essere molto più semplici poiché il carico va attraverso l'asse di rotazione, minimizzando le deformazioni del mandrino. Inoltre le operazioni manuali vengono semplificate se il mandrino non richiede rotazioni orizzontali-verticali per l'installazione di utensili o per un B-staging (delle gonne dei motori a razzo).

2.6.8 Tensionatori

Poiché molti rinforzi sono confezionati in rotoli, la tensione può essere applicata al rotolo. Freni magnetici o a frizione, dispositivi di riavvolgimento e barre rotanti a forbice sono i dispositivi usati. Gli ultimi due dispositivi basati sul riavvolgimento permettono che possa essere ripreso il materiale passato dalle cupole, così viene reso possibile l'avvolgimento di modelli a basso angolo attorno alle estremità delle cupole.

I tensionatori spesso sono montati su creels che sono lontani sia dall'avvolgitore sia dalle parti del carrello che effettivamente si spostano col sistema di distribuzione. I dispositivi di tensionamento dovrebbero possibilmente presentare molte delle seguenti caratteristiche: livelli di tensionamento variabili ma controllati, tensioni facilmente aggiustabili, capacità di riavvolgimento per prevenire l'allentamento della fibra, e uniforme tensionamento indipendente dalla grandezza del rotolo.

2.6.9 Forni

La produzione della parte in composito del complesso da assemblare, viene completata dalle operazioni di curing, sebbene alcuni sistemi di resina vengano trattati a temperatura ambiente e non richiedano un forno. Sono disponibili diverse tipologie di attrezzatura per curing con forno.

Le più comunemente usate sono forni (a gas, a microonde, o elettrici) o autoclavi.

La maggior parte dei sistemi di resine epossidiche vengono trattate in forni a gas riscaldati sia con aria sia con gas inerte, senza pressione supplementare. L'uso di vacuum bags e di tessuti di drenaggio è stato implementato da alcuni costruttori e il sistema viene descritto in grado di produrre laminati privi di vuoti e con provata compattezza. Le autoclavi vengono comunemente usate con le resine più esotiche come le bismaleimidiche e le polimidiche. Le bismaleimidiche richiedono una speciale considerazione per l'alto grado di compattamento richiesto per favorire il flusso della resina mentre le polimidiche necessitano della rimozione di un alto volume di materiali volatili prodotti durante il curing. Generalmente le autoclavi non vengono usate per i recipienti a pressione come tubi e serbatoi. Se un autoclave deve essere usata per recipienti a pressione, attenzione deve essere posta a non fare trasudare troppa resina. Una trasudazione eccessiva causa il rilasciamento dei filamenti e può anche causare raggrinzamenti, che disturbano l'efficienza della distribuzione del carico dei filamenti. Le autoclavi rappresentano lo stato dell'arte per i componenti non avvolti come i rivestimenti ed i pannelli per applicazioni aeronautiche per le quali l'interfaccia di pressione tra le fibre continue ed il mandrino termicamente dilatabile non può altrimenti svilupparsi durante il curing.

I forni a microonde per curing richiedono un alto investimento iniziale ma consentono risparmi a lungo termine in quanto riducono drasticamente i costi per energia e significativamente i tempi di curing. Comunque, speciali dispositivi aggiuntivi di riscaldamento come riscaldatori ad induzione, spesso sono richiesti alle interfacce composito/metallo, e il curing con forno a microonde lavora meglio con fibre non conduttrici.

2.6.10 Osservazioni

Tecnologia

La tecnologia filament winding evolverà verso attrezzature sempre più specializzate dato che la domanda per un maggior numero di prodotti filament wound aumenta. Ora, attrezzature dedicate si stanno utilizzando per mazze da golf, condotti per acqua o olio, fusibili elettrici e interruttori elettrici, serbatoi per gas commerciali a pressione, anelli di catene, accoppiamenti per trasmissioni, alberi motore e rotor, piccoli distanziatori e lamine di balestre per auto.

La tecnologia verrà sviluppata per mantenere gli alti valori di resistenza strutturale delle fibre vergini, come carbonio/grafite. Per esempio, aumenterà l'uso di sbobinatori per eliminare la tensione alle celle distributrici, e la tensione verrà applicata solo dopo la impregnazione delle fibre e sarà controllata dopo la formazione della banda. Verranno sviluppate nuove resine contenenti sensori e controlli.

Lo sviluppo di apparati e processi continuerà per permettere il rinnovamento delle fibre nelle strutture ad avvolgimento (con ciò permettendo il cambiamento di ampiezza di banda e di spessore).

Cambiando lo spessore della parete e la disposizione fianco a fianco delle fibre si può ottenere un aumento del numero dei prodotti che possono essere trattati in modo economicamente conveniente con filament winding, e si renderà possibile l'uso di minore materiale in strutture esistenti come componenti di ponti.

Prepregs in tows ed in bande diventeranno commercialmente disponibili in spessori piccoli da 0.08 a 0.10 mm. Comunque l'uso di fibre così sottili non è possibile nel wet winding. I plies molto sottili aumentano la quantità di plies e la resistenza di molte strutture. In molte strutture di velivoli spaziali sono state utilizzati plies molto sottili per costituire strutture quasi isotropiche.

Sensori e dispositivi per controllare il contenuto nella resina delle fibre impregnate a umido diventerà più comune. L'uso di queste apparecchiature ridurrà lo spreco di resina e l'inquinamento ora prevalente. L'uso di materiale ottenuto per avvolgimento come composto per stampaggio e come aggiunta a una componente principale, sta iniziando ad essere utilizzato per angoli di containers e corpi rotori.

2.6.11 Applicazioni

Ci si può aspettare che il filament winding verrà sempre più utilizzato per la costruzione di componenti nei seguenti settori:

- Trasporti: Travi di pavimentazione di treni, telai di porte, serbatoi a pressione, vani di corsa delle ruote dei bus, (per evitare lesioni ai passeggeri da scoppio dei pneumatici), auto cisterne stradali per vari liquidi (in Europa e in sud America ma non negli Stati Uniti), ponti a travate, colonne di edifici.
- Molle: Oltre alle molle piatte per auto e vagoni, una molla spiral- wound viene utilizzata per una porta di velivolo. Dischi circolari concavi avvolti vengono usati in serie come strutture atte ad assorbire urti durante l'atterraggio di alianti.
- Alberi motori per automobili: Quando si scoprì che un albero motore per una applicazione automobilistica (il GMT-400 camioncino a sponde basse) poteva essere competitivo relativamente al costo col suo omologo metallico, vennero fatti molti sforzi per trovare più applicazioni sui veicoli. Ora molti diversi veicoli, dai camion per i rifiuti alle auto da corsa usano alberi motori filament wound (Figura 2.21).

In futuro, queste applicazioni passeranno più frequentemente al filament winding, piuttosto che agli altri processi in competizione, a causa della convenienza del processo e poiché esiste una più affidabile tecnologia congiunta per alberi motori in filament wound che per alberi ottenuti per pultrusione.

- NGV Serbatoi: Il trend è stato quello di attrezzare più autobus con serbatoi filament wound per conformarsi con le restrizioni di tipo ambientale. L'impiego in campo automobilistico crescerà

notevolmente a seguito della recente qualificazione del tipo a due cilindri (con fibre carbonio/grafite avvolte a cerchio con resina epossidica su cilindri in lega di alluminio 6061 ad alta pressione) per uso nei taxi e nei minivan. Questo è solo l'inizio di un uso su larga scala nelle applicazioni automobilistiche.

- Volani per automobili: Finora il quadro dei costi per l'impiego di volani in applicazioni automobilistiche non è positivo. Molto più probabile è l'uso di grandi volani in compositi come immagazzinamento di energia in impianti per periodi non di punta. Questa idea è un grande affare meno costoso di quanto non sia costruire nuovi impianti di potenza e la sua attuazione non creerebbe i problemi ambientali legati alla realizzazione di nuovi impianti.



Figura 2.21: Alberi motori filament wound

2.7 Pultrusione

[1]

2.7.1 Introduzione

La pultrusione è un processo dall'alta redditività per la realizzazione di profili continui a sezione trasversale costante in materiale composito. Nata negli anni '50 la pultrusione ha guadagnato mercato e posizione di prominenza tecnica negli anni '80, ed è oggi ritenuta uno dei metodi produttivi di materiali compositi più versatili. Pultrusione è la denominazione sia del processo, sia del prodotto finito. Il processo consiste nell'estrudere una raccolta di rinforzi impregnati con resina reattiva attraverso una matrice calda che impartirà la geometria finale del profilo di composito. Ovviamente il fatto di ottenere un rinforzo continuo di fibre è un punto di forza del processo e garantirà buone caratteristiche meccaniche. La matrice in resina usata è tipicamente una resina termoindurente, che reagisce esotermicamente quando è introdotto calore subendo una polimerizzazione che garantisce eccezionali proprietà meccaniche. Il composito termoindurente ottenuto non può essere ristrutturato

o in qualche modo alterato all'interno del suo range operativo di temperatura. Al contrario invece nell'estrusione di alluminio e materiali termoplastici che generalmente coinvolgono materiali non rinforzati (omogenei) che sono riscaldati e spinti attraverso una matrice, questi materiali permettono di essere poi raffreddati e modellati nella forma finale del pezzo (es. processo di laminazione). Il materiale può essere riscaldato e riformato numerose volte con piccole perdite delle sue proprietà di base.

Negli anni '90 un gran numero di componenti meccanici venne realizzato in materiale composito pultruso e aumentò la competitività economica del processo anche grazie ad adeguati sviluppi nel design for manufacturing. La facile realizzabilità che negli ultimi anni ha avuto questo processo ha fatto sì che i materiali compositi pultrusi diventassero nel ventunesimo secolo un materiale tradizionale quali l'acciaio o l'alluminio.

2.7.2 Caratteristiche tecniche

Degli elementi base che costituiscono il processo della pultrusione, i tre che precedono il macchinario di pultrusione sono il sistema di manipolazione del rinforzo (in riferimento a roving e rettangoli di mat), la stazione di impregnazione della resina e l'area di formatura (o preformatura) del materiale. La macchina di pultrusione consiste in un attrezzatura che riscalda il materiale in ingresso, cura la resina reattiva, tira il prodotto attraverso la matrice e taglia il profilo finito alla lunghezza desiderata.

Il processo inizia quando il rinforzo è prelevato da una serie di bobine. Le fibre passano attraverso un bagno di resina dove vengono impregnate. Le fibre impregnate a questo punto sono raccolte a formare la geometria del profilo con un certo eccesso di resina che viene eliminato a questo punto. Il materiale consolidato arriva poi in una matrice calda in acciaio che ne definisce con precisione la forma definitiva. La matrice calda dà inizio ad una reazione esotermica nella matrice di resina termoindurente. Il profilo è continuamente tirato e fuoriesce di sezione costante caldo e con un trattamento di cura completamente eseguito con un tasso produttivo determinato dalla reattività della resina. Una volta uscito dalla matrice il profilo viene raffreddato in un ambiente ad aria forzata o assistito da spray d'acqua, continuamente tirato da un meccanismo che simultaneamente tira e ammorsa. Il prodotto esce dal macchinario di formatura e viene tagliato automaticamente alla lunghezza desiderata. Poi manualmente o automaticamente la parte viene rimossa dalla linea, ispezionata e sottoposta alle operazioni successive. Un processo di pultrusione necessita di pochissime aggiuntive operazioni di finitura in quanto la qualità superficiale è già elevata.

Macchinari di pultrusione possono operare con tassi produttivi che vanno dai 25 mm/min a 5m/min. Oggi tipiche linee produttive vanno dai 0.6 ai 1.5 m/min. E' possibile raggiungere alte produttività con l'utilizzo di flussi multipli con una sola macchina. Quasi il 100% dei materiali pultrusi sono utilizzabili direttamente senza ulteriori lavorazioni. La pultrusione di grandi volumi produttivi può essere eseguita con una percentuale di materiali di scarto inferiori al 2%.

Due generali categorie di prodotti pultrusi sono: verghe solide e barre commerciali prodotte con rinforzi monoassiali (orientazione di 0° rispetto alla direzione di pultrusione), che garantiscono le

più alte resistenze a trazione e rigidezza, e profili strutturali che utilizzano una combinazione di fibre monoassiali e multidirezionali di mat o tessuti per realizzare una combinazione di proprietà che raccolga le richieste delle applicazioni di carichi nelle direzioni trasversali (90°), longitudinali (0°), e fuori asse (da 0° a 90°).

Più del 75% dei prodotti pultrusi sono realizzati in rinforzo di fibra di vetro in matrice di resina poliestere. Quando le applicazioni richiedono una resistenza continua alla temperatura e le più alte proprietà meccaniche viene utilizzata come matrice resina epossidica e come rinforzo fibra di carbonio o aramide.

2.7.3 Vantaggi del processo

I prodotti pultrusi presentano le stesse comuni caratteristiche che si possono ritrovare negli altri processi di fabbricazione di materiali compositi, alto rapporto resistenza-peso, resistenza alla corrosione, stabilità dimensionale. Altri vantaggi derivano dalle caratteristiche del processo. Uno dei vantaggi è che la natura continua del processo permette la realizzazione di pezzi di qualunque lunghezza. Un altro importante vantaggio è la possibilità di realizzare forme complesse con pareti sottili, come può essere fatto ad esempio per gli estrusi in alluminio, grazie ai recenti sviluppi della tecnologia. Possono essere realizzate sezioni con cavità multiple utilizzando mandrini a sbalzo in acciaio e sofisticate guide di formatura. In aggiunta a profili con pareti di spessore costante che sono sempre facilmente realizzabili, è possibile anche pultrudere pareti a spessore variabile in una sezione trasversale costante, garantendo una grande flessibilità di progettazione. Nessun altro processo produttivo permette la realizzazione di profili complessi come la pultrusione.

Altro grande vantaggio è la possibilità di usare una grande varietà di matrici e tipi di rinforzo. Inoltre i rinforzi possono essere posizionati precisamente dove c'è bisogno di maggiori proprietà meccaniche e consistenza.

In aggiunta, le forme realizzabili possono essere di notevole larghezza in quanto l'attrezzatura può essere costruita virtualmente in qualunque dimensione.

La realizzabilità con il medesimo macchinario di formatura di profili multipli anche di forme diverse rende i materiali compositi pultrusi competitivi con i materiali tradizionali a causa del relativamente basso costo di produzione. Il capitale iniziale necessario per l'acquisto dei macchinari per la pultrusione e delle attrezzature di supporto è relativamente basso rispetto all'attrezzatura per l'estrusione di alluminio o materiali termoplastici. Il costo del tooling per la pultrusione è anche basso se confrontato con altri processi per la realizzazione di materiali compositi.

2.7.4 Applicazioni

Grazie alle nuove tecnologie di formatura, la pultrusione è in grado di realizzare quasi ogni forma di sezione trasversale che possa essere estrusa. Mentre gli estrusi d'alluminio pesano per un 15% su tutto l'alluminio consumato, in pultrusione è realizzato solo il 5% dei materiali compositi in matrice polimerica; perciò la pultrusione presenta un grande potenziale di crescita.

I pezzi in materiali compositi pultruso possono competere dal punto di vista dei costi solamente in settori in cui siano richiesti vantaggi ulteriori alla semplice realizzabilità della forma rispetto a materiali tradizionali, quali un alto rapporto resistenza/peso.

Si possono distinguere due categorie di forme pultruse che delineano due settori di business. La prima categoria comprende forme strutturali standard, scanalati, tubi, barre ad I, barre a flangia e barre commerciali che sono prodotte a magazzino in una grande varietà di gradi di performance (Figura 2.22).

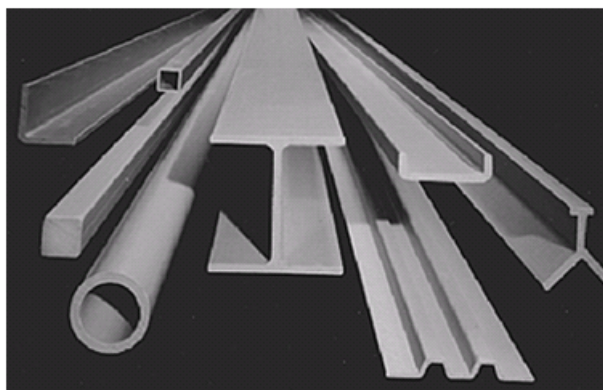


Figura 2.22: Forme strutturali standard pultruse

La seconda grande categoria è quella dei profili non commerciali, realizzazione nella quale un tecnologo della pultrusione deve assistere l'utilizzatore finale nella progettazione del profilo che deve rispondere ai requisiti necessari sia dal punto di vista funzionale che realizzativo. Le forme non commerciali sono di solito non simmetriche ed abbastanza complesse quando viene utilizzato il pieno potenziale tecnologico. Esempi di profili non commerciali sono riportati in Figura 2.23.

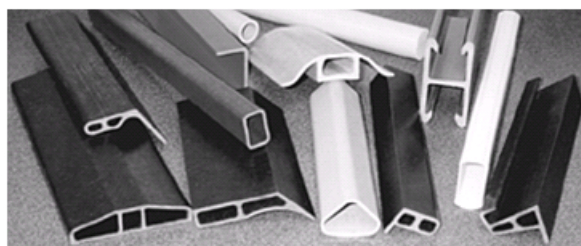


Figura 2.23: Profili non commerciali pultrusi

Numerose applicazioni si possono contare nel settore elettrotecnico, e delle costruzioni civili (passatoie ecc). In ogni caso prodotti pultrusi possono essere utilizzati nelle tipiche applicazioni in cui si usano classici estrusi di alluminio nella realizzazione di intelaiature e strutture space frame quali quella riportata in Figura 2.24.

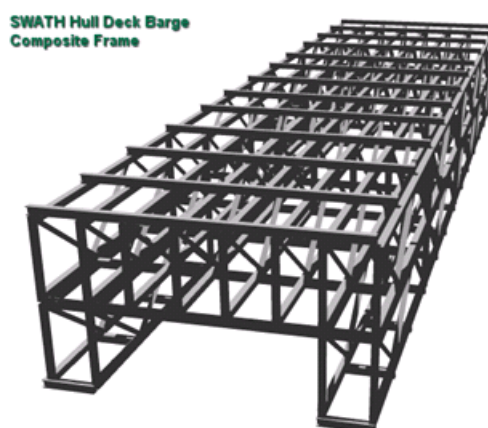


Figura 2.24: Strutture space frame

Nel settore automobilistico oltre a parti semistrutturali quali strutture di trasporto dei carichi negli autocarri, si può menzionare la realizzazione di un prototipo di telaio di autocarro completamente realizzato con parti pultruse in materiale composito, con un rilevante aumento di caratteristiche meccaniche rispetto al tradizionale telaio in acciaio.

In tutte le applicazioni esistenti, l'iniziale costo elevato del materiale composito deve essere pesato con i benefici durevoli in tutto il ciclo di vita del prodotto, che comportano un notevole aumento del tempo di vita del pezzo.

2.7.5 Settori tecnologici chiave

Ci sono tre aree tecnologiche critiche di pari importanza: la composizione del prodotto, la formazione del materiale, e controllo della temperatura del processo.

2.7.6 Composizione del prodotto

La formulazione della resina e la selezione del rinforzo determinano le proprietà del composito che soddisfano le esigenze applicative. Rinforzi sono stati selezionati per soddisfare le proprietà meccaniche desiderate. L'isolamento elettrico e la resistenza alla corrosione del composito sono determinati dalla quantità e dal tipo di rinforzo utilizzato. In molte applicazioni, è necessario un compromesso per soddisfare tutte le proprietà desiderate.

La pultrusione è un processo che permette la selezione del rinforzo del profilo delle sezioni utilizzando diversi materiali. Questo può essere realizzato in modo continuo, con una buona consistenza e ripetibilità. La selezione della resina è importante perché la resina determina le caratteristiche meccaniche, il range delle temperature di funzionamento, l'isolamento elettrico, la resistenza alla corrosione, e la resistenza del profilo alla fiamma e al fumo. Inoltre, determina la velocità del processo attraverso la sua reattività e può controllare in modo significativo l'estetica del prodotto e la tolleranza raggiungibile. La matrice di resina può essere alterata da additivi chimici e cariche, che contribuiscono a migliorare la sua capacità di gestire le temperature più elevate; fornisce migliore isolamento elettrico,

resistenza alla corrosione e stabilità dimensionale, e riduce la propagazione della fiamma e del fumo. Per il successo di qualsiasi profilo pultruso è essenziale che la matrice polimerica sia correttamente progettata per soddisfare le proprietà volute dall'utilizzo finale e ancora fornisce queste proprietà del processo che sono necessari per adempiere agli obiettivi economici della domanda. Questo equilibrio richiede significativa interazione tra l'utente finale e il produttore.

Formatura del materiale

L'area del materiale di formazione viene di solito viene dopo che i rinforzi sono stati impregnati con la resina. I rinforzi vengono posizionati precisamente utilizzando boccole in porcellana, forme di metallo, o guide di plastica che sono state lavorate per consentire rinforzi assiali e multidirezionali passando da uno al successivo prima di entrare nella matrice riscaldata. Queste guide, se correttamente progettate, possono garantire una coerente collocazione dei diversi tipi di rinforzo. Questi guide per la formatura possono diventare molto complesse e interattive su grandi profili e sezioni cave. Ciò richiede l'ingegnerizzazione dei rinforzi, il loro percorso, e la loro sequenza di formazione. Tuttavia, anche con una buona conoscenza dei materiali, le tecniche necessarie per produrre questi sistemi di produzione, possono richiedere anni per lo sviluppo. Anche con l'esperienza, un ingegnerizzazione notevole del processo on-line è necessaria per perfezionare la distribuzione del materiale e i sistemi di formatura. Questa tecnologia è fondamentale per la coerenza e l'ottimizzazione delle proprietà meccaniche e delle tolleranze e questo è l'aspetto più difficile da considerare per i nuovi produttori di pultrusi.

Controllo della temperatura di processo

Con le resine termoindurenti, è importante controllare la velocità e il livello con il quale il calore viene dato allo stampo o rimosso dal profilo. Se troppo poco calore viene dato allo stampo, il materiale composito non raggiungerà la temperatura esotermica desiderata, risultando così una cura incompleta e proprietà tutt'altro che ottimali nel profilo finale. Una temperatura troppo elevata può indurre stress termico di rottura appena il profilo si raffredda, risultando in un materiale che presenta uno scarso isolamento elettrico o cattiva resistenza alla corrosione.

2.7.7 Realizzazione del processo

Il processo di pultrusione è illustrato in Figura 2.25. Gli elementi base di tutte le macchine per pultrusione sono molto simili, si differenziano solamente nella selezione dei componenti addetti al riscaldamento del materiale, alla trasmissione di potenza, ai dispositivi di ammorsaggio e taglio. Sono disponibili numerosi hardware commerciali per il controllo del processo che permettono di riversare l'esperienza di quella che per anni è stata ritenuta una forma di artigianato nella realizzazione di un sistema produttivo industriale dalla elevata ripetibilità.

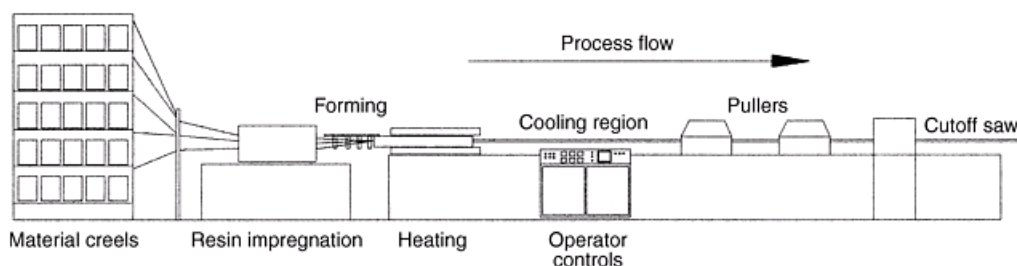


Figura 2.25: Schema del processo di pultrusione

2.7.8 Alimentazione del materiale

Il rinforzo è fornito in contenitori progettati per garantire una continua corsa di uscita del materiale (Figura 2.26). I roving continui di fibra di vetro sono forniti in imballi con presa al centro di 15, 25 Kg. Celle distributrici (creel) con 100 o più imballi sono comuni e possono essere fisse o mobili. Le celle distributrici sono fornite di guide e dispositivi per l'alimentazione continua del macchinario col materiale prelevato dagli imballaggi, mantenendo un buon allineamento delle fibre e minimizzando il loro danneggiamento. Alcune celle sono progettate per permettere l'utilizzo di occhi alimentatori multipli e barre di guida per personalizzare la tensione su ogni roving.

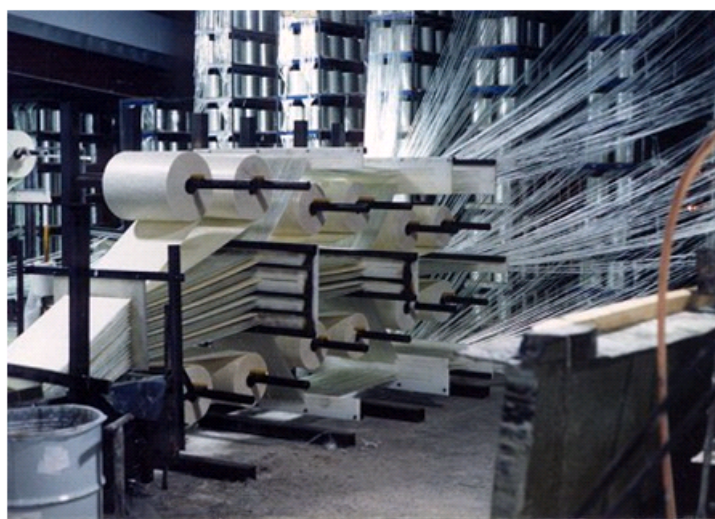


Figura 2.26: Contenitori progettati per garantire una continua corsa di uscita del materiale

L'utilizzo di imballaggi con presa al centro comporta il verificarsi di torsioni del materiale. Se questo vuole essere evitato devono essere utilizzati speciali imballaggi che fanno uso di nuclei di cartone progettati per la presa esterna (dipanamento) e che necessitano di celle distributrici più complesse e orientate orizzontalmente. Un'ulteriore necessità dell'imballo rotante è la presenza di un fuso raccoglitore che garantisca il mantenimento della tensione di alimentazione voluta.

Quando il materiale prosegue attraverso l'area di impregnazione è necessario controllare l'allineamento per prevenire torsioni, annodamenti e danneggiamenti del rinforzo. Questo può essere garantito dall'utilizzo di tavole verticali dotate di fori, secondo geometrie che sono funzione della forma del

profilo finale, che fungono da guida per la traiettoria di ogni strand o ply. Queste tavole (cards) possono essere standard o specifiche per ogni profilo non commerciale.

Impregnazione della resina e formatura del materiale

Vi sono diverse possibili modalità di impregnazione del rinforzo. La più comune è l'attraversamento da parte delle fibre di un bagno di resina aperto sulla sommità. Con questa metodologia le affastellature di fibre sono flesse da barre ad immergersi sotto il livello della resina e a risalire impregnate. Questa tecnica è utilizzabile in costruzioni realizzate completamente in roving o per prodotti che sono facilmente formati da ply piatti che escono dal bagno di resina. Nel caso in cui sia impraticabile l'immersione del materiale nel bagno, ad esempio quando è richiesto l'utilizzo di mat verticali o si vuole realizzare profilati cavi, il materiale passa direttamente attraverso un bagno di resina in linea. Su ogni linea di passaggio ed allineamento di fibre deve essere progettata una tavola di ingresso-uscita in cui avviene l'impregnazione della resina in linea. L'inevitabile presenza di perdite di resina e sgocciolamenti rende necessario un sistema di raccolta e ricircolazione della resina. Questo metodo alternativo permette la necessaria impregnazione senza il bisogno di muovere il rinforzo fuori dalla traiettoria di formatura.

La formatura del materiale di rinforzo è di solito susseguente all'impregnazione. Le guide di formatura sono generalmente a ridosso della matrice di pultrusione in modo da assicurare un allineamento perfetto tra il materiale formato e la cavità della matrice. L'avanzamento della formatura è guidato dalla forma delle guide di formatura e gli spazi tra le piastre di formatura devono essere progettate in modo da prevenire eccessi di tensione, ma anche in modo da garantire una sufficiente rimozione di resina per evitare eccessive forze di resistenza idraulica all'ingresso della matrice.

Nel caso di prodotti pultrusi tubolari è necessaria la presenza di un mandrino a sbalzo sufficientemente resistente da resistere alla forza del fluire del materiale.

Nel caso di iniezione della resina direttamente nella matrice, il rinforzo è formato secco e completamente compattato all'interno della matrice contemporaneamente all'iniezione di resina. Anche se questa tecnica minimizza i problemi associati al sistema di impregnazione con bagno in resina, esistono alcune limitazioni in termini di aree bagnabili, intrappolamento d'aria e massimo contenuto in fibre.

Il riscaldamento della matrice

Esistono numerosi metodi per posizionare ed assicurare la matrice di pultrusione alla macchina ed applicare il calore necessario per innescare la reazione di cura.

L'utilizzo di un letto aperto per la matrice con una sistemazione a giogo che permette alla matrice di essere fissata al telaio è una tecnica molto semplice. In tutte le tipologie di bloccaggio della matrice, la spinta che il materiale sviluppa sulla matrice deve essere trasferita al telaio evitando movimenti relativi della matrice o flessioni del telaio. Con questa progettazione a letto aperto a giogo il sistema riscaldante che utilizza olio caldo e resistenze elettriche a striscia o a piastra sono posizionate attorno

alla matrice nelle posizioni desiderate. Termocoppie sono posizionate sulla matrice per monitorare il livello di calore applicato. E' possibile progettare configurazioni di somministrazione del calore non simmetriche per garantire campi di temperatura uniforme in profilati non simmetrici.

Il parametro di processo della pultrusione il cui controllo è più critico è il profilo di temperatura della matrice in quanto questo determina il tasso di reazione di cura, il posizionamento della reazione all'interno della matrice e l'importanza del picco di temperatura esotermico. Materiali mal curati esibiranno scarse proprietà meccaniche e fisiche, anche se esteticamente identiche a parti correttamente curate. Un'eccessiva quantità di calore fornito può comportare cricche o imprevedibilità esotermiche. La dinamica della richiesta di calore e il tasso di energia di reazione rilasciata sono state recentemente modellate analiticamente, empiricamente e mediante l'uso di metodi agli elementi finiti permettendo di ottimizzare le condizioni del processo.

Per aumentare la produttività e ridurre la differenza di temperatura tra matrice e materiale che può portare a crack termici nella maggior parte dei prodotti, è spesso desiderabile preriscaldare il materiale prima che questo entri nella matrice. Questo può essere realizzato con onde elettromagnetiche, riscaldamenti per induzione, e convenzionali metodi a conduzione.

Dispositivi di taglio e trazione

La tipica distanza tra uscita dalla matrice e stazione di trazione è di 3 m o più, in quanto è necessario permettere al prodotto pultruso di raffreddarsi in atmosfera o mediante flussi di aria o acqua forzata. Questo permette al prodotto di raggiungere l'adeguata resistenza necessaria per sopportare le forze di ammorsaggio richieste per afferrare il prodotto e tirarlo fuori dalla matrice. I meccanismi di trazione sono i più svariati a seconda dell'architettura della macchina. Tre generali categorie di meccanismi per la trazione sono ammorsaggi a trazione intermittente a singola ripresa, ammorsaggi a trazione continua con doppia ripresa, e cinghie o catene traenti continue.

Stazione di taglio

Tutte le linee di pultrusione in continuo richiedono un taglio del prodotto a lunghezza. I sistemi di taglio utilizzano bracci radiali o seghe rotanti su tavole che si muovono a valle con il fluire del prodotto e sono attivati o manualmente sotto un allarme di cutoff, o automaticamente a misura. Sono utilizzabili sia tagli a secco che tagli a umido, ma solitamente sono utilizzati utensili da taglio con inserti in diamante o carburi di silicio. I prodotti rinforzati in fibra di aramide presentano una criticità al taglio a causa della durezza delle fibre. L'uso di utensili da taglio convenzionali comporta il seghetamento degli spigoli e delaminazione. Mentre il taglio ad acqua è soddisfacente, una tecnologia di taglio dai costi sostenibili è ancora allo studio.

2.7.9 Attrezzature di processo

L'attrezzatura di pultrusione presenta due aree di considerazione distinte, ma inseparabili:

- La matrice primaria, che costituisce il macchinario di precisione che fornisce la forma finale al prodotto
- I dispositivi richiesti per allineare e formare il materiale di partenza prima di entrare nella matrice ed i dispositivi richiesti per l'ammorsaggio ed il trascinamento del prodotto attraverso la matrice e l'allineamento durante il taglio

ATTREZZAGGIO PRIMARIO: la matrice di pultrusione è generalmente realizzata in acciaio da utensile temprato o indurito avente una durezza di 30 HRC. Le matrici per pultrusione sono generalmente costituite da più parti che sono combinate e montate insieme per realizzare le forme di profilo volute. Le finiture superficiali ottenibili garantiscono rugosità inferiori di $0.5 \mu m$. Le parti della matrice vengono imbullonate per resistere alla pressione interna sviluppata durante il processo. L'ingresso della matrice è affusolato e opportunamente raggiato per facilitare l'ingresso del materiale e diminuire l'usura della stessa associata con la compattazione delle fibre all'ingresso. La parte finale della matrice, cosiddetta di finitura, presenta riporti in cromo della durezza di 68 – 72 HRC.

E' molto difficile dare previsioni sulla vita di una matrice, ma una produzione di 15.000 – 30.000 m è comune per matrici con riporti al cromo, che può essere nuovamente riportato per estendere la durata del servizio.

ATTREZZAGGIO SECONDARIO: la tecnologia della formatura è l'area di questa tecnologia maggiormente investigata. Esecuzioni scorrette possono causare problemi quali scheggiature, fratture, distribuzione disomogenea di rinforzo e frequenti rotture, che rendono il processo che dovrebbe essere continuo ed economico molto difficile. In una esecuzione corretta la distribuzione costante e controllata di materiale assicurerà qualità riproducibile ed una produzione redditizia. Sono usati vari metodi di formatura, quali forme su piastre verticali di acciaio o plastica poste in sequenza a distanze via via decrescenti tra loro che vanno gradualmente ad allinearsi, collimare e formare il materiale alimentato. In alternativa o in congiunzione con le tavole di formatura, possono essere utilizzati dei fogli continui di formatura in acciaio. Per aiutare le fibre ad avviarsi verso la giusta traiettoria di formatura vengono usate delle guide quali occhielli, tondini ecc. Mentre la realizzazione della matrice è relativamente semplice e affidata ad aziende specializzate esterne, lo sviluppo del sistema di formatura unico per ogni tipo di profilo da realizzare è molto complesso ed è basato fondamentalmente sull'esperienza acquisita nell'ottimizzazione del processo di formatura e per questo molto spesso eseguito dallo stesso pultrusore.

I dispositivi di ammorsaggio dipendono dal tipo di macchinario di trazione che viene usato. Di solito sono costituiti da diversi tamponi in uretano conformi alla complessità del profilo. La progettazione degli afferraggi deve garantire il non superamento delle pressioni di contatto limite che danneggerebbero la superficie del profilo.

Devono essere previsti afferraggi e guide anche nella zona di taglio in quanto movimenti relativi potrebbero risultare in tolleranze di lavorazione scarse o tagli imprecisi.

2.7.10 Materiali

Uno dei vantaggi del processo di pultrusione è l'ampio range di materiali che possono essere utilizzati che permettono il raggiungimento di un ampio spettro di proprietà del composito. Il progettista, data la specifica geometria da realizzare, deve considerare la funzione che dovrà svolgere il prodotto finito, gli effetti di variabili quali temperatura, atmosfera, ambiente e tempo, per scegliere i materiali adatti. Ogni scelta comporta un impatto economico e l'ottimizzazione del rapporto costi/performance può essere raggiunta con una buona conoscenza delle necessità dell'applicazione e dei materiali utilizzabili.

2.7.11 Proprietà del prodotto pultruso

Proprietà meccaniche

La grande varietà di tipi di rinforzo, forme, stili e frazioni in volume di fibra realizzabili fanno sì che le proprietà meccaniche proprie di un prodotto pultruso possano essere le più svariate. Come visto la resistenza lungo una direzione può essere grandemente influenzata sostituendo il rinforzo longitudinale con un random mat o un tessuto direzionale. Un prodotto con rinforzo solo longitudinale esibirà proprietà meccaniche almeno dieci volte superiori se misurate in direzione longitudinale rispetto alle misurate in direzione trasversale. In questo tipo di compositi le proprietà delle fibre dominano le proprietà assiali, mentre le proprietà della resina dominano le proprietà trasversali. Nell'accurata rappresentazione delle proprietà di questi prodotti non isotropi è necessaria l'acquisizione di misure di resistenza nelle diverse direzioni che vanno dalla longitudinale alla trasversale. La Tabella 2.5 illustra l'effetto che l'orientazione ha su di alcune proprietà meccaniche.

Material	Property														
	Specific gravity	Tensile strength		Tensile modulus		Flexural strength		Compressive strength, axial		Dielectric strength, parallel		Thermal conductivity		Coefficient of thermal expansion, 10 ⁻⁶ /K	Water absorption, wt%
		MPa	ksi	GPa	10 ⁶ psi	MPa	ksi	MPa	ksi	kV/cm	kV/in.	W/m · K	Btu · in/h · ft ² · °F		
Solid rod and bar, 70% W _{fiber} all unidirectional fiber	2.00	690	100	41.4	6.0	690	100	410	60	23.6	60	0.30	2.0	3.0	0.25
Profiles, 50% W _{fiber} multidirectional reinforcement	1.80	242	35	17.2	2.5	242	35	138	20	7.87	20	0.576	4.0	4.4	0.6

Tabella 2.5: Proprietà generali dei prodotti pultrusi in fibra di vetro

La Tabella 2.6 mostra l'effetto sulle proprietà finali lungo la direzione di pultrusione ad un'uguale frazione in volume di fibre per diversi tipi di fibre continue. Il contributo specifico dato dal tipo di fibre risulta così molto evidente. A causa della esistenza di così tante opzioni, anche circa il solo rinforzo unidirezionale, è difficile redigere una lista completa delle proprietà ottenibili. Il progettista deve saper estrarre le informazioni di interesse per giungere alle informazioni sulle proprietà di interesse per poter utilizzare gli orientamenti realizzabili al fine di ottenere il comportamento desiderato del pezzo.

Fiber type	Specific gravity	Property, lengthwise							
		Tensile strength		Tensile modulus		Compressive strength		Thermal conductivity	
		MPa	ksi	GPa	10 ⁶ psi	MPa	ksi	W/m · K	Btu · in./ h · ft ² · °F
Fiberglass ^(a)	2.00	690	100	41	6.0	410	60	0.30	2.0
Carbon ^(b)	1.65	1000–1500	150–220	100–140	15–20	620–970	90–140	0.85–1.40	6–10
Aramid ^(c)	1.28	1400	200	80	12	280	40	0.15	1

Tabella 2.6: L'effetto sulle proprietà finali lungo la direzione di pultrusione

(a) Rovings unidirezionali E-vetro. Basati sul 60% del volume di fibra.

(b) Fibre di carbonio AS

(c) Fibre DuPont Kevlar 49 [50].

La geometria finale della parte spesso costringe all'utilizzo di un determinato processo.

Molto spesso l'uso di questi materiali compositi è scelto in sostituzione di materiali tradizionali quali acciaio, alluminio o legno. Alcune proprietà delle più comuni alternative di materiali sono riportate in Tabella 2.7. Anche se Tabella 2.7 compara vari materiali in termini di resistenza e rigidità assolute, è anche spesso desiderabile determinare lo spessore del rinforzo plastico in fibra di vetro (FRP) necessario per garantire resistenza e rigidità equivalenti a quelle del materiale tradizionale. Una tale analisi è mostrata in Tabella 2.8, utilizzando i dati di Tabella 2.7 ed i valori di geometria della sezione, resistenza e rigidità del prodotto finale.

Una simile analisi può essere condotta anche per tipi di fibre alternativi, per determinare i fattori di spessore equivalente per materiali altoresistenziali e dall'elevato modulo elastico. Il relativo costo per unità di volume può essere prontamente determinato.

Material	Property					
	Tensile strength		Tensile modulus		Flexural strength	
	MPa	ksi	GPa	10 ⁶ psi	MPa	ksi
Wood						
Maple	100	15	12.4	1.80	55	8
Pine	60	9	12.1	1.75	35	5
Thermoplastics						
Unreinforced (typical)	55	8	3.4	0.5	55	8
Reinforced (typical)	100	15	6.9	1.0	140	20
FRP pultrusions						
50% wt mat and roving	242	35	17.2	2.5	242	35
70% wt unidirectional roving	690	100	41.4	6.0	690	100
Metals						
Aluminum	280	40	70	10	280	40
Steel	690	100	210	30	690	100

Tabella 2.7: Proprietà dei più comuni materiali alternativi al FRP [1]

Pultrusion composition	Specific gravity	Steel			Aluminum			Wood		
		Tensile strength	Tensile modulus	Flexural strength	Tensile strength	Tensile modulus	Flexural strength	Tensile strength	Tensile modulus	Flexural strength
Profiles, 50% wt _{fiber} multidirectional reinforcement	1.80	2.5	2.15	1.82	1.0	1.49	1.16	0.25	0.79	0.45
Solid rod and bar, 70% wt _{fiber} all unidirectional fiber	2.00	1.0	1.71	1.12	0.4	1.19	0.71	0.10	0.63	0.27

Tabella 2.8: Fattore di spessore equivalente del FRP fabbricato mediante pultrusione [1]

2.7.12 Proprietà fisiche

La conducibilità termica dei prodotti compositi pultrusi rispecchia le caratteristiche sia del rinforzo che della matrice. Generalmente i rinforzi in fibra di vetro sono eccellenti isolanti in ambiente termico ed elettrico.

Mentre i compositi rinforzati con fibra di vetro presentano un modesto positivo coefficiente di dilatazione termica, sia i rinforzati in fibra di carbonio che in fibra di aramide presentano un coefficiente di dilatazione termica leggermente negativo.

Questa sostanziale stabilità dimensionale è utilizzata come vantaggio in strutture aerospaziali e nella produzione di parti dalle tolleranze molto stringenti. L'espansione termica può comportare stati tensionali di formatura in sistemi di rinforzi multidirezionali in cui sono utilizzati tipi diversi di fibre (ibridi). Dopo l'uscita dalla matrice, le tensioni residue tendono a rilassarsi causando distorsioni dimensionali che possono presentarsi sia nella sezione trasversale (angolari o planari) o assiale (ondulazione, torsione o inarcamenti).

Caratteristica fisica strategica per l'utilizzo in campi in cui è desiderato un alto rapporto resistenza-peso è la bassa densità di questi materiali, che garantiscono alte resistenze specifiche e moduli elastici specifici.

Altro aspetto molto importante è la abbastanza elevata resistenza all'impatto dei rinforzi a fibra organica, il che li rende utilizzabili per applicazioni di assorbimento di energia. La resistenza all'impatto delle fibre di carbonio è generalmente bassa, e i materiali compositi che ne fanno uso compensano questa mancanza con opportune matrici di resina. Le fibre di vetro hanno caratteristiche di resistenza all'impatto intermedie tra le precedenti. La resistenza alla fatica dei rinforzi in fibra di carbonio è superiore rispetto ai rinforzi in fibra di vetro, in modo particolare quando viene usata resina epossidica.

2.8 Pull Winding

[1]

2.8.1 Introduzione

Il processo originale di tirare un fascio di fibre unidirezionale attraverso una matrice per il curing è rimasto inalterato fino a metà degli anni '60 [51]. A questo punto, i produttori di pultrusi, sia in Europa

che in USA, svilupparono il processo di aggiungere strisce di tessuto o lastre formate e mat di fibre al sistema di pultrusione in modo da fornire resistenza trasversale e a taglio nelle sezioni ad angolo di forme complesse pultruse. In aggiunta, il concetto era stato sviluppato per il Filament winding posto sopra ad una macchina per pultrusione in modo da fornire un cerchio avvolto attorno alla forma pultrusa. Questo processo è conosciuto come “Pull winding” ed è particolarmente utilizzato per tubi e barre. Non è possibile aggiungere il processo di filament winding ad una struttura che ha una forma concava, come angoli, canali e travi ad I. Un tipico processo di pull winding è mostrato in Figura 2.27.

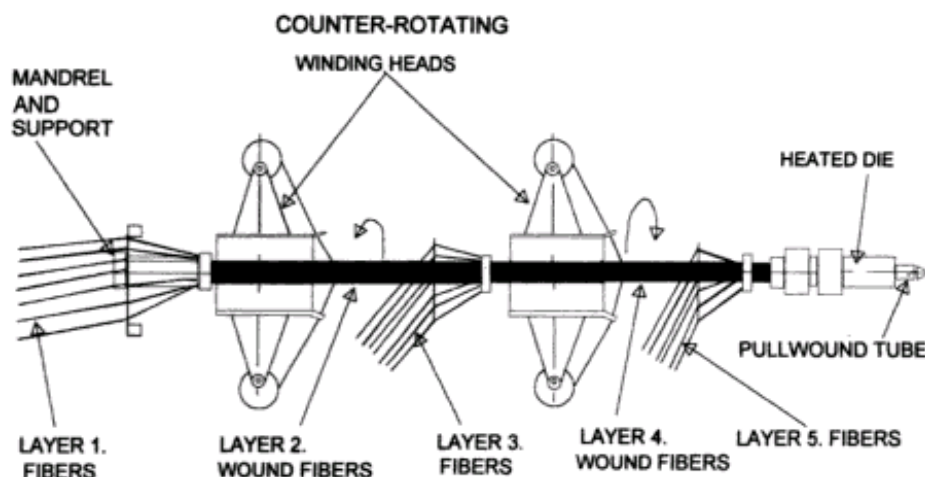


Figura 2.27: Strato di tubo su una macchina con due teste pull winder

2.8.2 La tecnica Pull Winding

La tecnica pull winding è stata scoperta in Europa ed è stata utilizzata frequentemente dai produttori europei per fornire strutture tubolari pultruse sia rotonde che tubolari [52,53]. Tale processo combina le fibre continue unidirezionali del processo di pultrusione con quelle continue avvolte circolarmente. Le fibre longitudinali vengono utilizzate per la resistenza assiale e a momento flettente mentre quelle circolari vengono utilizzate per le tensioni circonferenziali e la resistenza a compressione. La combinazione dei due processi di pultrusione e di winding fornisce virtualmente un numero illimitato di possibilità. Comunque, l'aumento della complessità del processo limita queste combinazioni. Normalmente, le fibre longitudinali sono posizionate all'interno e all'esterno delle superfici del tubo con uno o due strati avvolti posizionati nella parete interna del tubo. Questi strati avvolti circolarmente non sono veramente avvolti a 90° poiché a causa della naturale leggera forma ad elica del winding e del movimento laterale dell'avvolgitore, un avanzamento in larghezza corrisponde con ogni passo circonferenziale. Dipendendo dal diametro del tubo, l'angolo di winding è tipicamente ovunque di 80° - 87° . Il winding può essere eseguito in entrambi i sensi sia orario che antiorario e in aggiunta alla tensione circonferenziale e alla resistenza compressione può anche fornire un grado di resistenza a torsione al tubo. Vengono utilizzate con queste tecniche teste di pull winder singole o doppie. Il processo di pull winding è mostrato in Figura 2.27 e la procedura per l'uso di questi sistemi è facilmente

intuibile. La caratteristica di controllo più importante per il processo di pull winding è il controllo della velocità di avvolgimento e il controllo della posizione rispetto al movimento lineare della forma pultrusa dalla macchina. Questo viene raggiunto attraverso l'accurata percezione della velocità del moto longitudinale e utilizzando un microprocessore di controllo per coordinare la velocità di rotazione della testa del motore.

Questa relazione definisce il grado di winding il quale è definito come la distanza lineare percorsa durante un giro della testa. Con il microprocessore di controllo il grado può essere variato, fornendo così variazioni di contenuto della fibra e la relativa posizione angolare, come richiesto. Uno scritto di D.E. Shaw Stuart [54] definisce i vantaggi principali della pull winding sopra altri metodi di fabbricazione del tubo come:

- Si tratta di un processo continuo completamente automatico
- E' dimensionalmente accurato e ripetibile
- Produce tubi con un buon grado di finitura esterno
- Può avere il colore incorporato
- Si possono ottenere sezioni di parete più sottili rispetto a quelle ottenute con i convenzionali processi di pultrusione o di filament winding

2.8.3 Pullwinding

Il Pullwinding è un metodo di produzione di tubi in composito ad alte prestazioni, che combina la convenzionale tecnica di pultrusione con il Filament winding in continuo.

Questa tecnica permette di includere i rinforzi longitudinali a strati avvolti ad elica, che forniscono proprietà torsionali e resistenza circonferenziale. La tecnologia interfaccia un unità winding autocontrollata e autoportante con una macchina per la pultrusione, fornendo il cerchio o gli angoli di fibre fra gli strati di fibre unidirezionali per il cure successivo nella matrice di pultrusione. L'attrezzatura per il pullwinding consiste in due teste gemelle winding, che girano in direzioni opposte sopra il pultruso. La fibra può essere angolata nella direzione che si vuole. La figura 2.28 mostra il principio del processo di pullwinding.

Il pultruso e le fibre rinforzate passano attraverso l'albero cavo, mentre le teste winding applicano le fibre bagnate sopra le fibre impregnate. Strati successivi di impregnato unidirezionale possono essere forniti tra le teste winding e dopo l'ultima testa winding prima del che il pacco di rinforzi entra nella matrice di pultrusione. La tecnica permette la produzione di componenti per applicazioni pressure/vacuum [55].

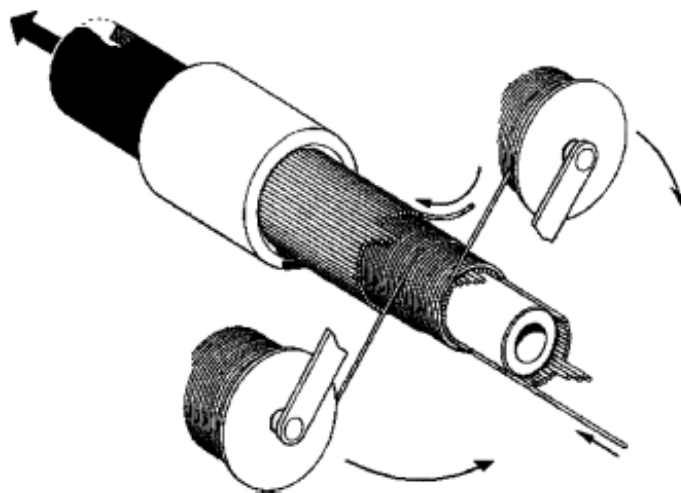


Figura 2.28: Pullwinding

2.9 Braiding

2.9.1 Introduzione

Il braiding è un processo tessile conosciuto per la sua semplicità e versatilità. Le strutture realizzate in braiding sono uniche per il loro alto livello di conformabilità, stabilità torsionale e resistenza al danneggiamento. Molte tecniche complesse di disposizione del materiale per i processi di fabbricazione in preregs sono state convertite e modificate in braiding. L'estensione del braiding bidimensionale e tridimensionale ha aperto nuove opportunità nella realizzazione di forme finite e strutture in composito alto-resistenziali al danneggiamento. Nel processo di braiding, due o più sistemi di yarn sono attorcigliati secondo direzioni preferenziali a formare una struttura integrata. I materiali realizzati in braiding differiscono dal woven e dai tessuti realizzati tradizionalmente (lavorati a maglia)(knitted) nel metodo di introduzione dello yarn nel tessuto e nel modo in cui ogni yarn è intervallato. Tessuti braiding, woven e tessuti tradizionali sono confrontati nella Tabella 2.9.

Parametri	Braiding	Weaving	Knitting
Direzione preferenziale dell'introduzione dello yarn	Una (Direzione della macchina)	Due ($0^\circ/90^\circ$) (warp e fill)	Una (0° or 90°) (warp o fill)
Tecniche base di costruzione	Attorcigliamento (definizione della posizione)	Intrecciatura (inserire gli yarn a 90° dentro gli yarn a 0° yarn selezionandoli)	Interlooping (stringere i loops degli yarn sopra i loop precedenti)

Tabella 2.9: Confronto delle tecniche di costruzione del tessuto

Il braiding presenta molte somiglianze con il filament winding. Yarn secchi o preimpregnati, nastri o tow possono essere tessuti in braiding su di una forma rotante e removibile o su di un mandrino in maniera tale da assumere varie forme, orientazioni di fibre e frazioni in volume di fibre. Anche se il braiding non può garantire una frazione in volume di fibre alta quanto il filament winding, i tessuti braiding possono assumere forme più complesse (curvature più strette) rispetto alle preforme realizzate in filament winding. La natura intrecciata dei tessuti in braiding garantiscono anche un alto livello di integrità strutturale, risultando più maneggevoli, facili alle giunture e resistenti ai danneggiamenti. Mentre è facile provvedere a rinforzi circonferenziali (90°) nel filament winding, rinforzi longitudinali (0°) possono essere introdotti più facilmente in un processo di braiding triassiale. Studi realizzati dalla McDonnell Douglas Corporation hanno dimostrato che compositi realizzati in braiding possono essere prodotti al 56% del costo dello stesso realizzato in filament winding grazie alla riduzione di manodopera nell'assemblaggio ed alla semplificazione della progettazione [56]. Utilizzando il processo braiding tridimensionale non solo è possibile prevenire i cedimenti interlaminari tipici del filament winding o dei processi di tape lay-up, ma possono anche essere migliorate le caratteristiche meccaniche interlaminari tipiche dei compositi laminati.

La tecnica di tessitura braiding ha origini storiche antiche ed è sempre stata utilizzata nelle applicazioni in cui era richiesto un alto livello di stabilità torsionale, flessibilità e resistenza all'abrasione [57,58]. D'altro canto però a causa della sua limitata larghezza e relativamente bassa produttività (in relazione alle capacità della macchina), i tessuti braiding non hanno guadagnato un utilizzo esteso nell'industria tessile come i tessuti woven, knitted e nonwoven. Solo dal 1980 la letteratura si è interessata in modo convincente al braiding in relazione ai materiali compositi con una grande concentrazione di articoli sul braiding tridimensionale. Il braiding ha guadagnato popolarità nell'industria dei compositi a causa dei vantaggi che nella tecnologia di strutture in composito portavano le caratteristiche uniche delle strutture braiding, nonché i recenti progressi negli hardware e software di gestione del processo. La tendenza attuale della ricerca sulla tecnologia di braiding sta cercando di affiancare alla natura completamente integrata e alla capacità unica di realizzare forme finite, anche l'espansione verso braiding di grande diametro. Si stanno sviluppando tecniche per braiding su man-

drini di forma sempre più complessa, braiding multidirezionali, ed usi estensivi di software CAD per la fabbricazione.

2.9.2 Classificazione dei tessuti braiding

Una delle caratteristiche più interessanti del braiding è la sua semplicità. Un tipico macchinario per la realizzazione di tessuti braiding (Figura 2.29) essenzialmente consiste di una tavola in cui sono realizzate delle piste, dei rocchetti vettore, un punto di formazione del tessuto e dispositivi di scorrimento del tessuto realizzato. In alcuni casi è utilizzato un anello di inversione per assicurare una tensione uniforme sugli yarn del braiding. La risultante geometria braiding è definita dall'angolo di braiding, θ , che definito come metà dell'angolo formato dagli intrecci del sistema di yarn rispetto alla direzione di avanzamento di lavorazione. Lo spessore delle strutture realizzate in braiding è funzione della frequenza di intrecci. La distanza tra i punti di intreccio è nota come *pick spacing*. La larghezza o il diametro del tessuto realizzato in braiding (piatto o tubolare) è rappresentato come d .

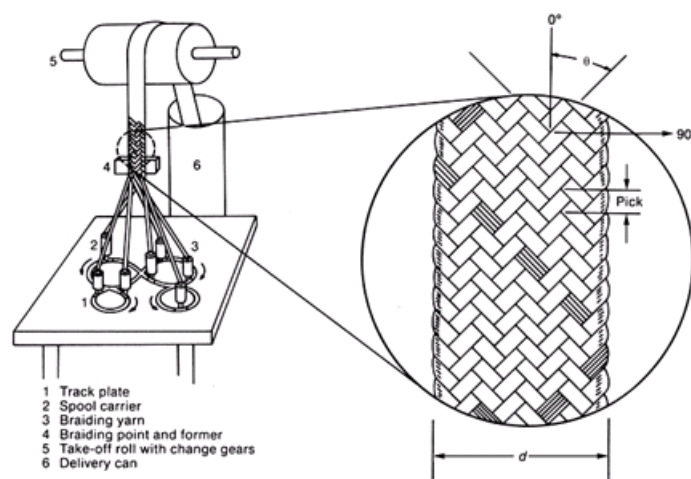


Figura 2.29: Macchinario per la realizzazione di tessuti braiding

La tavola di pista supporta i rocchetti vettori che si muovono lungo le traiettorie delle piste. I rocchetti vettori sono dispositivi che garantiscono l'intreccio degli yarn attorno secondo le traiettorie dettate dalle piste e controllano la tensione degli yarn nel formare il braiding. Nel punto in cui si forma il braiding è utilizzato un dispositivo di formatura che controlla la dimensione e la forma del tessuto braiding. Il braid è quindi fatto avanzare su di un rullo movimentatore ad un predeterminato rateo. L'orientazione degli yarn ed il diametro del braid possono essere controllati dal controllo della velocità di avanzamento e dal numero di rocchetti. La direzione di braiding è un parametro flessibile di controllo in quanto può essere orizzontale, verticale dal basso all'alto o invertito. Quando è richiesto un rinforzo longitudinale può essere inserito un terzo sistema di yarn in modo da realizzare un braid triassiale con orientazione delle fibre $0^\circ \pm \theta^\circ$. Se è richiesta una struttura avente uno spessore più elevato di quello realizzabile con un braid singolo, possono essere intrecciati gli uni sugli altri anche strati di tessuto per realizzare lo spessore voluto. Per un alti livello di rinforzo su tutto lo spessore

possono essere utilizzati in maniera integrata braiding tridimensionali, braiding a pista multipla e braiding a spillo. Il movimento dei rocchetti può seguire un tracciato a serpentina od ortogonale per mezzo di un meccanismo di guida od un meccanismo di controllo di Jacquard (*lace braiding*). Jacquard braiding fa uso di un meccanismo che permette a gruppi connessi di yarn di realizzare il braiding su diversi modelli simultaneamente.

Diversi criteri di classificazione di tessuti braiding sono mostrati in Tabella 2.10. Per semplicità, e per uniformità con la esistente letteratura sui compositi, le dimensioni delle strutture realizzate in braiding sono utilizzate come criterio di categorizzazione. In particolare, strutture braiding aventi sistemi a due yarn intrecciati con o senza un terzo yarn solo posizionato, sono considerati braiding bidimensionali. Quando tre o più sistemi di yarn sono intrecciati per formare una struttura integralmente braided, allora si realizza un braiding tridimensionale.

Parametri	Biassiale	Triassiale	Multiassiale
Dimensione del braid	2-D	3-D	3-D
Forma	Forma composta	Forma composta	Forma netta
Direzione del braiding	Orizzontale	Verticale	Verticale invertita
Costruzione del braid	1/1	2/2	3/3
Meccanismo di controllo per il movimento dei rocchetti	Positivo	Positivo	Jacquard
Tipo di braiding	Circolare	Piano	Jacquard, speciale

Tabella 2.10: Classificazione braiding

2.9.3 Braiding bidimensionale

Nella progettazione e selezione del processo adatto per l'utilizzo del braiding nei compositi è necessario comprendere in che modo frazione in volume di fibre e geometria siano funzione dei parametri di processo. La frazione in volume di fibre dipende dal macchinario utilizzato in termini di numero ed orientazione degli yarn. La geometria dipende dal macchinario in termini di orientazione delle fibre e forma finale.

Prodotti braiding possono essere prodotti in forme piatte o tubolari intrecciando tre o più sistemi di yarn insieme. La natura biassiale dei tessuti in braiding permette grande conformabilità, resistenza a taglio e resistenza all'impatto. Braiding triassiale può essere prodotto introducendo yarn a 0°, come mostrato in Figura 2.30, per garantire rinforzo in quella direzione.

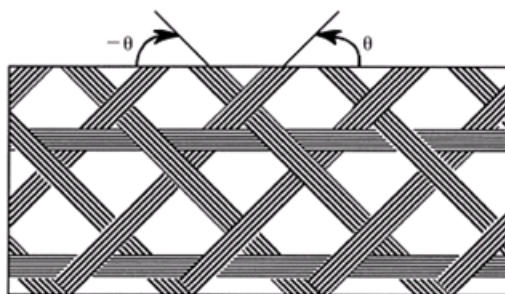


Figura 2.30: Struttura di un braid triassiale

Tessuti multistrato possono essere formati semplicemente intrecciando avanti e indietro o intrecciando nella stessa direzione fino al raggiungimento dello spessore voluto. I tipi di fibra e l'angolo di intreccio possono essere variati secondo necessità [59]. A causa dell'alta conformabilità di queste strutture, il braiding è stato oggetto di grandi sviluppi negli ultimi anni. Alcune realizzazioni di forme e architetture di fibre sono illustrate in Figura 2.31, che illustra il processo di braiding su di un mandrino assialsimmetrico che avverrà in accordo alle istruzioni generate attraverso un modello cinetico del processo.

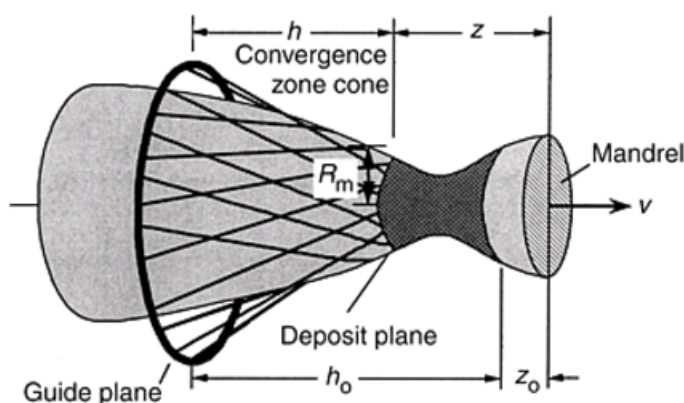


Figura 2.31: Braiding su di un mandrino assialsimmetrico

2.9.4 Braiding tridimensionale

La tecnologia di braiding tridimensionale è un'estensione del braiding bidimensionale in cui il tessuto è costituito intrecciando yarn per formare una struttura integrale attraverso il posizionamento.

Caratteristica unica del braiding triassiale è la eccezionale capacità di garantire la presenza di rinforzi su tutto lo spessore ed allo stesso tempo permettere grande flessibilità di fabbricazione su di un amplissimo range di forme complesse che vanno da barre piene, barre ad I, ugelli a parete spessa. Braid tridimensionali vengono prodotti sui macchinari tradizionali realizzando forme piene, circolari o a sezione quadrata [60]. Uno schema generale del processo di braiding tridimensionale è riportato in Figura 2.32. Gli yarn assiali, se presenti nel particolare braid, sono alimentati nella struttura direttamente da distributori posizionati dietro alla tavola a piste. Gli yarn sono alimentati da bobine montate sui rocchetti vettori che si muovono sulla tavola a piste. Il modello di movimento

relativo tra i rocchetti e gli yarn assiali determina sia il tipo di braid che si vuole realizzare, sia la microstruttura.

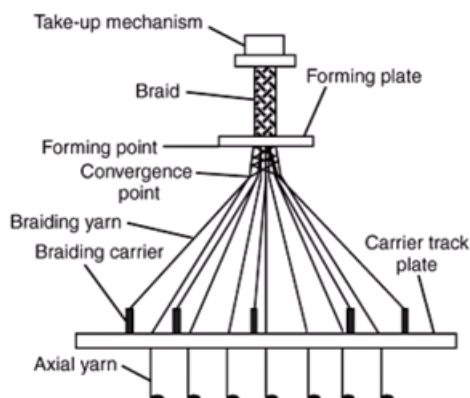


Figura 2.32: Schema di un braider tridimensionale generalizzato

Il track e column braiding sono i processi più diffusi nella fabbricazione di preforme braided triassiali. Il meccanismo di queste tipologie di braiding differisce dal meccanismo tradizionale solamente nel modo in cui i rocchetti sono spostati per creare la geometria finale braid. Invece di muoversi in modo continuo lungo una determinata forma, come nel braider solido, questo metodo tridimensionale di braiding invariabilmente muove i rocchetti in sequenza, in modo discreto.

2.9.5 Proprietà dei compositi in braiding

Le proprietà dei compositi braided non sono così bene caratterizzate come quelle dei compositi a deposizione unidirezionale o laminati. Per i compositi in braiding bidimensionale la maggior parte degli studi si è concentrata su braid tubolari. Per i compositi in braiding tridimensionale, si stanno raccogliendo i primi dati risultanti da studi in ambito accademico e governativo. In aggiunta alla grande facilità di conformazione a forme complesse, l'altra grande proprietà che rende i compositi in braiding di grande interesse è l'ottimo comportamento all'impatto in termini di energia assorbita e limitazione delle aree di danneggiamento [61,62].

Riguardo a compositi braiding bidimensionali studi su tubolari in fibra di vetro e resina epossidica hanno riportato che la resistenza a trazione del composito era comparabile a quella degli acciai dolci a bassa densità. La Tabella 2.12 riassume i risultati. Il composito presenta una densità di 1.66 g/cm³ ed una frazione in volume di fibre del 75%.

Angolo di braid [gradi]	Resistenza alla trazione		Resistenza alla compressione		Taglio sul piano
	Attorcigliato	Steso	Attorcigliato	Steso	
	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	
89	1320	21	700	220	55
86.75	1250	83	380	100	75
82.50	1030	...	330	...	...
78	730	...	275	...	...

Tabella 2.11: Proprietà dei compositi in fibra di vetro con matrice epossidica in braid 2-D

Proprietà di compositi in braiding triassiale di fibra di carbonio in resina epossidica sono riassunte in Tabella 2.12. Il modulo elastico è abbastanza sensibile all'angolo di braiding. In direzione longitudinale, a causa degli yarn introdotti in direzione 0° , il modulo elastico è meno sensibile all'angolo di braiding. E' anche mostrato che l'aggiunta di yarn longitudinali può permettere la compensazione della bassa resistenza in compressione tipica dei tessuti braiding.

Angolo di braid [gradi]	$V_f, \%$	E_{LT}	E_{LC}	E_{HT}	V_{LHT}	V_{LHC}	V_{HLT}
		[GPa]	[GPa]	[GPa]			
45	33.8	61.4	62.7	6.8	0.56	0.64	0.044
63	29.3	49.0	49.6	15.2	0.43	0.45	0.088
80	56.3	...	52.4	43.6	...	0.13	0.110

Tabella 2.12: Proprietà dei compositi in grafite-resina epossidica in braid triassiale

V_f , Volume di fibra; E Modulo di elasticità; ν Coefficiente di Poisson

In uno studio eseguito da D.Brookstein e T.Tsiang [63], è stata dimostrata, come viene riportato in Figura 2.33, la capacità di costruire dei fori mediante il processo di braiding, rivelandone la superiorità a resistenza di un foro aperto e di un foro di spillo rispetto ai fori fatti con le macchine.

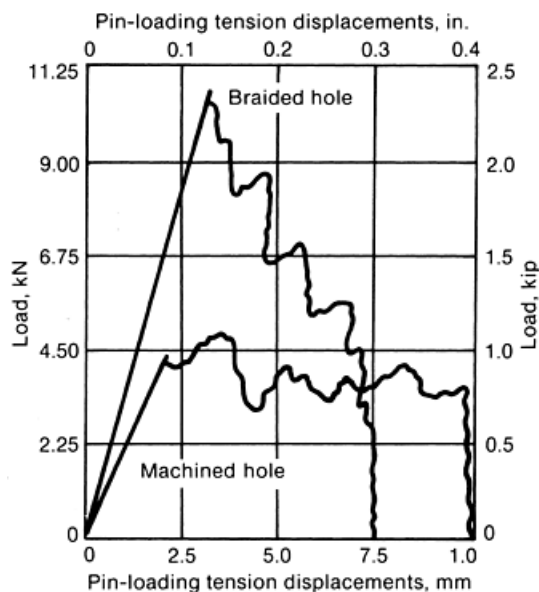


Figura 2.33: Resistenza dei fori braided rispetto a quelli fatti con le macchine

Riguardo ai compositi braiding tridimensionali la Tabella 2.12 mostra i risultati di sperimentazioni che hanno investigato sull'effetto che la dimensione e il tipo di costruzione braiding di fasci con orli tagliati hanno su resistenza a trazione, compressione flessionale e a taglio. Come mostrato in Tabella 2.13 la resistenza a trazione di un composito in fibra di carbonio e resina epossidica ha subito una riduzione circa del 60%. Quando sono stati aggiunti yarn longitudinali (0°), la riduzione di resistenza è stata minore del 50%. Quindi grande cura deve essere esercitata nella preparazione di compositi in braiding nell'assicurare che gli yarn sulla superficie non siano danneggiati. Nella stessa Tabella si possono anche osservare gli effetti del tipo di costruzione braiding e dell'orientazione superficiale delle fibre. Passando da una costruzione 1×1 a 3×1 (vedi testi specializzati) l'orientazione superficiale delle fibre si riduce da 20° a 12° , il che comporta un aumento della resistenza a trazione da 665.6 Mpa a 970.5 Mpa.

$1 \times 1.3 \times 1$ e 1×11 -modelli di braid con bordi tagliati e non tagliati. Volume di fibra (V_f), 68%

Proprietà	Tipo di fibre e modello di braid					
	T300 ^(b) , 1 × 1 (non tagli- ate)	T300, 1 × 1 (tagli- ate)	T300, 3 × 1 (non tagli- ate)	T300, 3 × 1 (tagli- ate)	T300, 1 × 1 × $\frac{1}{2}$ fissate (non tagliate)	T300, 1 × 1 × $\frac{1}{2}$ fissate (tagli- ate)
Resistenza a trazione [MPa]	665.5	228.7	970.5	363.7	790.6	405.7
Modulo di elasticità [GPa]	97.8	50.5	126.4	76.4	117.4	82.4
Resistenza a compressione [MPa]	...	179.5	...	226.4	...	385.4
Modulo di comprimibilità [GPa]	...	38.7	...	56.6	...	80.8
Resistenza a flessione [MPa]	813.5	465.2	647.2	508.1	816.0	632.7
Modulo a flessione [GPa]	77.5	34.1	85.4	54.9	86.4	60.8
Coefficiente di Poisson	0.875	1.36	0.566	0.806	0.986	0.667
Angolo apparente della fibra	±20°	±20°	±12°	±12°	±15°	±12°

Tabella 2.13: Proprietà dei compositi in grafite-resina epossidica in braid 3-D

- I provini a trazione e compressione sono Tabellati alla fine
- T300 yarn di grafite, 30,000 fasci

In Tabella 2.14 è illustrato l'effetto della taglia del fascio di yarn. Si è rilevato che la resistenza a trazione ed il modulo elastico di compositi in braiding tridimensionali tendono ad aumentare all'aumento della dimensione del fascio. Questo è apparentemente in relazione dell'orientamento delle fibre alla dimensione del fascio di yarn. Fasci di yarn grandi producono leggere piegheature e perciò maggiore resistenza e modulo elastico. Le Tabelle 2.13 e 2.14 mostrano che anche se i compositi braiding presentano resistenza e modulo elastico molto maggiore rispetto ai laminati 0°/90° in tessuto woven, i coefficienti di Poisson sono eccessivamente elevati, da 0.67 a 1.36. Per compensare ques-

ta instabilità caratteristica nella direzione trasversale, si è dimostrato che l'aggiunta di un 10% in volume di fibre trasversali può ridurre il coefficiente di Poisson a 0.27 a scapito di una riduzione di resistenza a trazione e modulo elastico da 1250 Mpa e 100 Gpa a 1000 Mpa e 90 Gpa rispettivamente.

Proprietà	Tipo di fibre e modello di braid						
	AS-4, 3K, 1 × 1	AS-4, 6K, 1 × 1	Celion, 6K, 1 × 1	AS-4, 12K, 1 × 1	Celion, 12K, 1 × 1	T300, 30K, 1 × 1	T300, 8 tessuti satinati im- brigliati
V_f , %	68	68	56	68	68	68	65
Resistenza a trazione [MPa]	736.8	841.4	857.7	1067.2	1219.8	655.6	517.1
Modulo di elasticità [GPa]	83.5	119.3	87.8	114.7	113.1	97.8	73.8
Taglio in travi corte [MPa]	114.8	126.0	71.4	121.4	71.4	...	69.0
Coefficiente di Poisson	0.945	1.051	0.968	0.980	0.874	0.875	0.045
Resistenza a flessione [MPa]	885.3	739.8	...	1063.3	...	813.5	689.5
Modulo a flessione [GPa]	84.5	95.2	...	1385.2	...	77.5	65.5
Angolo apparente della fibra	±19°	±15°	±15°	±13°	±17.5°	±20°	0°

Tabella 2.14: Proprietà dei compositi in grafite-resina epossidica in braid 3-D in funzione del modello di braid

2.9.6 Resistenza a impatto

Alcuni studi hanno riportato che anche se i compositi in braiding di fibra di carbonio e resina epossidica non hanno aumentato la soglia di danneggiamento, hanno però limitato con successo l'estensione della zona danneggiata, in confronto alle convenzionali strutture laminate. Altri studi mostrano come braiding tridimensionali in fibra di vetro assicurino notevoli aumenti di livelli di assorbimento di energia sia durante le prime fasi di impatto che nella propagazione del danno rispetto ai compositi laminati. In questi studi riguardanti braid tridimensionali Celion 3K – PEEK termoplastici, si è dimostrato che la resistenza a compressione dopo l'impatto dei compositi braiding è molto più elevata e stabile rispetto ai compositi laminati.

Per mostrare la grande flessibilità nella progettazione e le grandi proprietà strutturali del braiding

tridimensionale nella realizzazione di forme finite in composito, sono stati realizzati degli studi su barre ad I in braiding composito tridimensionale in fibre E-glass e matrice in resina poliestere. E' stato dimostrato che le proprietà meccaniche di prodotti in materiale composito di forma finita possono essere modificate attraverso il posizionamento strategico del materiale nel processo di braiding. Per esempio la Tabella 2.15 mostra che l'aggiunta di yarn longitudinali nelle flange delle barre ad I porta ad un aumento del 50% dei moduli elastici in trazione e compressione. Inoltre non si osservano i difetti da delaminazione tipici dei compositi laminati, grazie all'alto livello di rinforzo su tutto lo spessore tipico del braiding tridimensionale.

	Barra I 1	Barra I 2	Barra I 3
Geometria	Braid	Braid/lay-in	Braid/lay-in
Fibra	Vetro	Vetro/vetro	Vetro/carbonio
Volume della fibra, %	50	60	65
Lunghezza [mm]	452	460	447
Test span [mm]	305	305	305
Larghezza [mm]	31	31	32
Altezza [mm]	32	33	33
Modulo a trazione [GPa]	18.34	30.54	44.82
Modulo a comprimibilità [GPa]	21.10	30.54	68.26
Resistenza a flessione [MPa]	150.5	237.9	292.0
Modulo a compressione [GPa]	20.62	29.44	68.67
Resistenza a compressione [MPa]	145.1	176.4	175.9

Tabella 2.15: Proprietà di barre ad I in fibra di vetro-poliestere in braiding 3-D

2.10 Produzione di compositi in matrice termoplastica (Thermofforming)

2.10.1 Introduzione

Per motivi di importanza commerciale e grande diffusione si pone l'attenzione soprattutto su tecnologie produttive riguardanti matrici in resina termoindurente, con la notevole eccezione del compression molding (thermoforming).

La principale ragione del basso utilizzo delle matrici termoplastiche, consiste nel fatto che esse tendono ad essere utilizzate, nella produzione di un composito, con maggiore difficoltà delle matrici termoindurenti. Comunque ciò non significa che non esistano tecniche per produrre compositi con matrici termoplastiche. Infatti, alcune tecniche, anche se in ambito limitato, sono state sviluppate mentre si sta ulteriormente approfondendo il loro studio. In questo capitolo si vuole fornire un panorama delle più comuni tecniche per la produzione di compositi strutturali termoplastici. Il termine "strutturale" viene usato per indicare la capacità di sopportare sostanzialmente carichi meccanici, chiarendo che i compositi strutturali vengono rinforzati con fibre continue o almeno relativamente lunghe, ed escludendo così di proposito per esempio lo stampaggio per iniezione.

2.10.2 Caratteristiche dei compositi con matrici termoplastiche

Ci sono piccole differenze nelle proprietà ingegneristiche delle matrici termoplastiche e termoisolanti pulite (non rinforzate), sebbene quelle termoisolanti tendano ad essere significativamente più dure e più resistenti alle elevate temperature, grazie ai loro legami crociati covalenti intermolecolari.

Le matrici termoplastiche d'altro canto, possiedono valori di tensione di rottura considerevolmente maggiori, il che significa che esse sono solitamente più resistenti al danneggiamento.

Queste differenze tra tipi di matrice in gran parte si riflettono in differenze simili nei polimeri rinforzati. Comunque le proprietà meccaniche planari sono generalmente fortemente condizionate dalle fibre, il che significa che ogni differenza nelle proprietà meccaniche della matrice tende a venire nascosta. Al contrario, per le proprietà non planari e per le caratteristiche di tolleranza alla temperatura, che sono normalmente determinate dalla matrice, una tale differenza può divenire molto evidente.

Tra i molti fattori che influenzano la processabilità vi sono: la viscosità della matrice, le caratteristiche di processo in termini di pressione, temperatura e tempo, la tutela della salute dei lavoratori.

Una bassa viscosità facilita l'impregnazione di rinforzo, in cui ogni fibra di rinforzo idealmente dovrebbe essere circondata da matrice senza nessun vuoto. Resine completamente polimerizzate hanno pesi molecolari molto alti, il che significa che le loro viscosità di fusione sono almeno di due ordini di grandezza più alte delle viscosità di fusione delle matrici termoisolanti, il che rende l'impregnazione significativamente più difficoltosa. Mentre alcune matrici termoisolanti possono venire collegate con legami crociati a temperatura ambiente, altre matrici termoisolanti e tutte le matrici termoplastiche richiedono una processazione ad alta temperatura che deve essere controllata con precisione per ottenere costantemente le caratteristiche desiderate. La più alta viscosità delle matrici termoplastiche determina la necessità di più alte pressioni per realizzare lo stesso grado di flusso di materiale che si ha con le matrici termoisolanti, ma in molti casi questa differenza non è considerevole. Mentre da una parte le matrici termoplastiche necessitano di essere fuse, formate e poi raffreddate, per realizzare una stabilità dimensionale, nel giro di secondi, dall'altra le matrici termoisolanti possono impiegare alcuni giorni per formare completamente i legami crociati.

In realtà, la differenza è notevolmente piccola, ma è generalmente vero che i compositi con matrici termoplastiche possono venire prodotti più rapidamente di quelli con resine termoisolanti. La vera natura dei compositi con matrici termoisolanti li rende sgradevoli da lavorare poiché nella loro produzione sono coinvolte reazioni chimiche che implicano la produzione di sostanze volatili potenzialmente tossiche. Invece, la struttura molecolare di una matrice termoplastica completamente polimerizzata la rende chimicamente inerte se processata correttamente, il che significa che nessuna sostanza pericolosa deve essere presa in considerazione.

Il costo di matrici termoplastiche e termoisolanti pulite sono paragonabili, a meno che la tolleranza ad alta temperatura costituisca un problema. Inoltre le termoisolanti sono vantaggiose. Anche quando il punto di partenza per una data tecnica di produzione è una qualche forma di materiale semilavorato in cui parte o tutta la impregnazione di rinforzo è stata già compiuta, i materiali basati

su resine termoindurenti sono in generale meno costosi (grazie alla loro bassa viscosità che semplifica l'impregnazione). Comunque nelle giuste condizioni, il costo del componente può alla fine risultare più basso del composito a matrice termoplastica per il tipo di produzione più veloce, più semplice e quindi più economico. Mentre le matrici termoindurenti chiaramente dominano nelle applicazioni strutturali di materiali compositi, l'interesse per le matrici termoplastiche è derivato da alcuni vantaggi potenziali come riassunto nella Tab. 2.16 . Quando si prende in considerazione questa tabella è importante considerare che nessun confronto assoluto simile a questo può essere mai fatto in modo imparziale. Per esempio, una matrice termoplastica ad alta performance conferirà migliori proprietà ad un composito rispetto ad una matrice termoindurente a performance standard (senza considerare i costi).

Proprietà	Compositi	
	Termoindurenti	Termoplastici
Costo	+	
Tolleranza alla temperatura	+	
Dilatazione termica	+	
Contrazione volumetrica	+	
Durezza	+	
Resistenza	+	
Tenacità		+
Tempo di usura	+	
Deformazione viscosa	+	
Resistenza chimica		+
Disponibilità dei dati sui materiali	+	
Tempo di inutilizzo		+
Semplicità chimica		+
Viscosità	+	
Temperatura di processo	+	
Pressione di processo	+	
Tempo di processo		+
Coinvolgimento ambientale		+
Esigenze di stampaggio	+	
Riformabilità		+
Riciclabilità		+

Tabella 2.16: Vantaggi matrici termoplastiche

(a) “+” denota un vantaggio comparativo

2.10.3 Forme dei materiali

In linea di massima le forme possibili di materiale grezzo per l'uso nella produzione dei compositi sono le seguenti.

- Rinforzo e matrice separati (per una impregnazione in-process)
- Molding compound (orientati in modo casuale, con rinforzo continuo o discontinuo ad una frazione di fibre in volume tipicamente con un range che va da 0.1 a 0.3, rinforzo parzialmente o completamente impregnato).
- Prepreg (corto per rinforzo preimpregnato; rinforzo orientato e in genere continuo ad una frazione di fibre in volume superiore a 0.6, rinforzo parzialmente o completamente impregnato)

Nella produzione di compositi a matrice termindurente, forme separate di rinforzo e matrice e molding compounds sono i più comuni, mentre i prepregs sono la norma nelle applicazioni ad alta performance. Al contrario, nella produzione di compositi a matrice termoplastica, l'uso separato di matrice e rinforzi era più o meno inaudito, a causa delle difficoltà della impregnazione e molding compounds o prepreg erano essenzialmente sempre richiesti. Comunque è possibile impregnare il rinforzo con un monomero liquido come processo iniziale di produzione, monomero che ha basso peso molecolare e perciò anche bassa viscosità. Conseguentemente all'impregnazione, il monomero viene polimerizzato (ma non si formano legami incrociati) realizzando un alto peso molecolare con conseguenti utili proprietà strutturali. Questa non è una idea nuova, ma essenzialmente fino a poco tempo fa, essa non è mai stata applicata fuori dal laboratorio utilizzandola commercialmente per le restrizioni imposte dalle necessità del processo che ora appaiono assai ridimensionate.

Così matrici termoplastiche polimerizzabili in situ possono essere usate in molte tecniche convenzionali di costruzione con resine termindurenti, rendendo possibile così un'intera gamma di nuove opportunità per i compositi a matrice termoplastica. Comunque, con le matrici termoplastiche polimerizzabili in situ, il problema precedentemente accennato della sicurezza dell'ambiente di lavoro anche se minimizzato a seguito dell'uso di una matrice inerte, non può più a lungo essere trascurato.

Matrici termoplastiche completamente polimerizzate sono solide a temperatura ambiente e possono essere ottenute in forma di pellet, polvere, film o fibre. I monomeri destinati alla polimerizzazione in situ sono anche essi solidi a temperatura ambiente e così necessitano di essere fusi prima di essere miscelati con il catalizzatore e l'iniziatore richiesto per realizzare la polimerizzazione. Grazie al loro basso peso molecolare, la temperatura di fusione di un monomero è notevolmente più bassa di quella della matrice termoplastica completamente polimerizzata (ad alto peso molecolare).

Sia nel modellamento dei composti a matrice termoplastica che nei prepregs, il rinforzo può essere o completamente impregnato con matrice completamente polimerizzata (attraverso fusione o impregnazione con solvente) o miscelato intimamente (attraverso impregnazione a polvere o mescolando fibre di rinforzo con fibre della matrice.) Nell'ultimo caso, l'impregnazione da fusione deve essere realizzata ad uno stadio più tardivo, sia in una fase intermedia di consolidazione, sia come parte finale del modellamento di un componente.

Prepregs con matrici termoplastiche completamente impregnati vengono generalmente forniti come ampi fogli o stretti nastri o rotoli. Nella maggior parte dei casi, il rinforzo è unidirezionale (in direzione longitudinale) ma sono disponibili forme materiali tessute o intrecciate. Prepregs impregnati e mescolati sono forniti come yarns, spesso tessuti o intrecciati in una struttura tessuta, sebbene questi materiali possano essere anche impregnati a polvere. Composti impregnati a fusione per modellazione vengono forniti come rigidi fogli, spesso tagliati secondo dati caratteristici. In contrasto composti impregnati a polvere per modellazione sono flessibili e normalmente distribuiti in rotoli. Le forme materiali che sono già completamente impregnate sono legate per produrre una più completa consolidazione ed un più basso contenuto di vuoto nel composito, ma i prepregs impregnati a polvere e mescolati hanno il vantaggio del più basso costo, della migliore drappeggiabilità e della

facilità con cui essi vengono tessuti ed intrecciati.

2.10.4 Descrizione delle tecniche

La produzione dei compositi richiede un preciso controllo della temperatura e della pressione durante tutto il ciclo di produzione ed un controllo sul materiale. Il requisito fondamentale di ogni tecnica di produzione è quello di applicare sufficiente pressione per mantenere il rinforzo liquido e la massa della matrice nella forma desiderata ad una specificata temperatura, per il tempo richiesto per realizzare stabilità dimensionale. Se il rinforzo deve anche essere impregnato come parte del processo, è in primo luogo richiesto un gradiente di pressione per condurre la matrice attraverso il rinforzo. La produzione dei compositi con matrice termoplastica comprende le seguenti fasi:

1. Riscaldamento della matrice finchè è liquida (o alternativamente riscaldamento del monomero finchè è liquido e miscelazione col catalizzatore e con l'iniziatore)
2. Applicazione di un gradiente di pressione per impregnare il rinforzo (a meno che non vengano usati composti per modellazione o prepregs)
3. Applicazione di pressione per rendere conforme il rinforzo impregnato allo stampo
4. Periodo di attesa per la polimerizzazione (se applicabile)
5. Raffreddamento del materiale finchè la matrice solidifica e il componente è dimensionalmente stabile.
6. Rimozione del componente dallo stampo.

Con l'eccezione del compression molding che essenzialmente impiega sempre molding compounds, il seguente trattamento si basa sull'uso di prepregs (contenenti matrici termoplastiche completamente polimerizzate) come materiale grezzo poiché i prepregs sono stati ed ancora costituiscono il punto di partenza nella maggior parte dei casi. Con i prepregs, la produzione dei compositi può avvenire in gruppi ed essere più o meno continua. Nella tecnica per gruppi, il percorso dal prepreg al componente finale può essere diviso in tre fasi fondamentali: lay-up, consolidamento e stampaggio. Nella prima fase il numero richiesto di plies prepreg necessari per realizzare lo spessore desiderato dopo il consolidamento vengono depositi. La seconda fase consiste nel consolidamento dei plies in un laminato monolitico e la terza fase consiste nel dare al foglio la forma nella geometria finale. In alcuni casi due o anche tutte e tre le fasi possono essere combinate in una operazione, ma più comunemente le fasi sono distinte e separate.

Nelle tecniche di tipo continuo, il lay up di prepreg di solito diventa parte integrante della fase di consolidamento come pure qualche volta anche la fase di stampaggio, che viene realizzata in linea attraverso l'applicazione localizzata di calore e pressione. Ciò ha dato origine al termine consolidamento on line.

Il meccanismo responsabile della formazione di legami tra matrici termoplastiche è chiamato autohesion e può produrre una forza vergine da una parte all'altra di una interfaccia materiale in una frazione di secondo a condizione che le superfici siano a temperatura sufficientemente alta da consentire una significativa mobilità molecolare e che istantaneamente siano portate ad intimo contatto. Mentre questa forza vergine può esser realizzata in laboratorio molto rapidamente in esperimenti di consolidamento di compositi, è raramente possibile realizzare tempi di consolidamento egualmente corti nelle situazioni reali di produzione. Nella maggior parte dei casi non è la autohesion che limita la velocità del processo; è il tempo richiesto per riscaldare e raffreddare il materiale, dato che ha una conduttività termica molto bassa. Dal momento che in questo capitolo si prende in particolare considerazione le tecniche di produzione relativamente meglio conosciute, occorre anche ricordare che ci sono alcune limitazioni riguardo a quale può essere il modo per produrre un composito. Così, ogni processo in cui il liquido di rinforzo e la massa di matrice è soggetta ad una temperatura e ad una pressione sufficiente probabilmente da origine ad un composito; se le proprietà del composito risultante rispondono alle richieste e se il processo di produzione è economicamente attuabile sono due questioni totalmente diverse. Nel tentativo di capire gli aspetti essenziali della tecnologia di produzione di un composito, considerare le risposte alle seguenti domande dovrebbe risultare utile:

- Cosa viene usato come stampo per dare al composito la sua forma?
- Come è fatto il materiale grezzo per conformarsi allo stampo?
- Come viene creato il gradiente di pressione di impregnazione? (se applicabile?)
- Come viene applicata la pressione di consolidamento?
- Come viene controllata la temperatura?

Prepreg lay-up

Il modo più semplice di esguire un lay-up di plies di prepreg per realizzare gradualmente un composito è quello di tagliare il prepreg a mano e di fare sempre a mano il lay-up. Comunque in molti casi viene usata una attrezzatura automatica per tagliare il prepreg alla dimensione voluta. Il lay up di prepreg di matrici termoplastiche è simile a quello equivalente con matrici termoidurenti, ma una differenza importante è la completa mancanza di viscosità nei prepregs a matrice termoplastica, che possono essere realizzati artificialmente attraverso fusioni localizzate di plies adiacenti usando per esempio, un saldatore o un riscaldatore ad aria calda. Per prepreg impregnati a fusione e prepreg impregnati a solvente anche la drappeggiabilità (lavorabilità) è scarsa e per permettere la conformazione allo stampo durante il lay up, il drappeggio può essere anche artificialmente realizzato per mezzo del riscaldamento localizzato. Tessuti fatti con impregnazione a polvere e con forme materiali mescolate, invece, posseggono drappeggiabilità ma la viscosità deve essere artificialmente creata. Seguendo il lay up, la pila di prepreg viene consolidata e modellata impiegando le tecniche descritte più avanti.

Il lay up manuale richiede naturalmente molto tempo, ma ciononostante é estremamente comune e ciò è dovuto all'avanzato stato della ricerca e allo sviluppo di molte operazioni di produzione. Comunque, ci sono anche strumenti automatici per fare il lay up di tessuti. L'attrezzatura concettualmente simile a quella usata per il lay up automatizzato di tessuti prepreg termoindurenti può anche essere usata per lay up di prepregs con matrici termoplastiche direttamente sullo stampo. In questo caso le superfici di accoppiamento vengono dapprima riscaldate e poi unite sotto pressione; vedi la Fig. 2.34 . Se, sia il materiale precedentemente depositato col lay up, sia il nastro che sta formandosi, hanno superfici completamente fuse quando essi sono uniti, una fase separata di consolidamento può non essere necessaria e il componente così è pronto per la rimozione dallo stampo non appena il lay up è completato (ciò significa che il lay up, il consolidamento e il modellamento vengono realizzati contemporaneamente). Comunque , e ciò è dovuto al riscaldamento localizzato e disomogeneo, é molto difficile evitare tensioni residue e deformazioni del componente e può essere quindi più appropriato mirare ad un parziale consolidamento (conseguentemente più rapido) per garantire che i prepregs stiano in posizione e poi che il modellamento ed il consolidamento avvengano in fasi separate (come verrà approfondito più avanti).

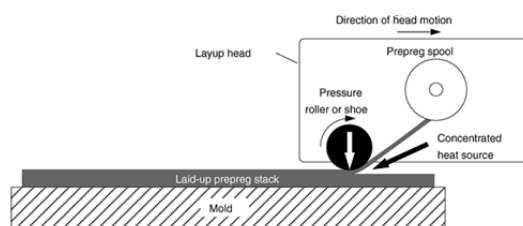


Figura 2.34: Schema di automated lay-up di prepreg in matrice termoplastica (risultante in parziale o completo consolidamento)

Prepreg consolidation

Mentre un ampio range di tecniche è tecnologicamente realizzabile per il consolidamento di una pila di prepreg termoplastici posati in un laminato piatto, solamente alcuni sono economicamente convenienti per la grande serie: matched-die-consolidation (consolidamento su matrice), double-belt-press- consolidation (consolidamento a pressa a doppio nastro) e calendering (calandratura).

Nel consolidamento su matrice, una o più presse sono usate per consolidare la pila di prepreg in uno stampo piatto. Una versione di questa tecnica utilizza un forno per il riscaldamento dei prerpeg fino alla fusione della matrice, dopo di che la pila di prepreg è velocemente trasferita ad una pressa con uno stampo raffreddato (Fig. 2.35). La pressa viene quindi velocemente chiusa applicando la pressione di consolidamento sufficiente durante il raffreddamento. Questa tecnica di consolidamento è sfruttata al meglio per prepreg con impregnazione completamente fusa, ed il tempo di ciclo può essere anche inferiore al minuto assumendo che la matrice sia completamente fusa quando esce dal forno.

Nel consolidamento intermittente su matrice i prepreg vengono riscaldati in un forno fino al raggiungimento della fusione della matrice, dopo di che i materiali fusi vengono inseriti in una pressa

con uno stampo raffreddato, il quale si chiude per consolidare la pila di prepreg (Fig. 2.36). La pressa poi è aperta, il materiale viene fatto avanzare gradualmente in modo intermittente, ed il processo è ripetuto per produrre gradualmente un componente continuo.

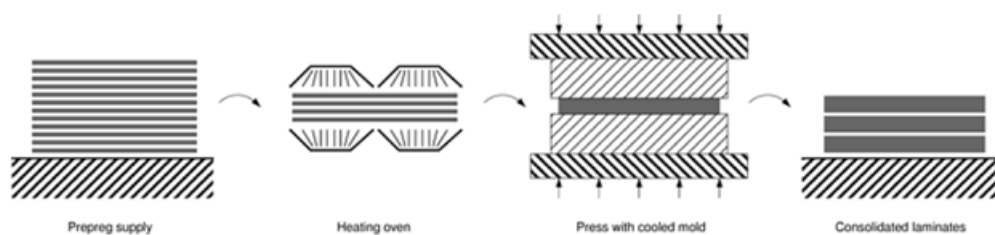


Figura 2.35: Schema di consolidamento su matrice di composito termoplastico in pressa

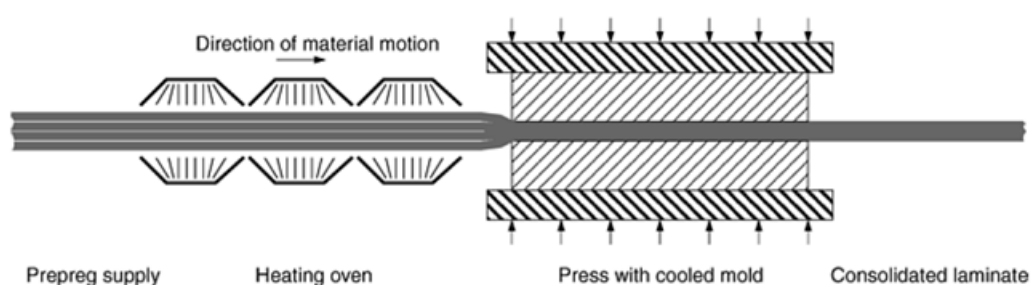


Figura 2.36: Schema di consolidamento intermittente di composito termoplastico

Il consolidamento con pressa a doppio nastro offre la metodologia più efficiente per il consolidamento continuo di prepreg in laminati piatti (Fig. 2.37). Il prepreg entra nella pressa ed è riscaldato sotto pressione finchè la matrice non fonde, dopo di che il laminato è raffreddato sotto pressione fino ad uscire dalla pressa completamente consolidato. In questo caso la deposizione del prepreg ed il consolidamento sono essenzialmente realizzati simultaneamente dato che il prepreg alimentato è srotolato da un rullo di materiale per via dell'avanzare del nastro della pressa.

Per quanto riguarda la tecnologia della calandratura, i prepregs sono riscaldati in un forno per la fusione della matrice e poi vengono fatti consolidare in bloccaggi tra una coppia di rulli di calandratura raffreddati (in modo simile al rollforming, ma con rulli dal diametro costante).

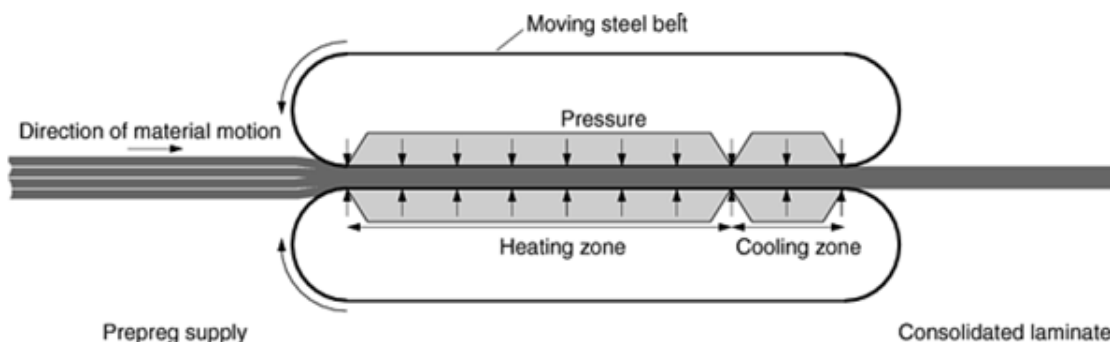


Figura 2.37:

Schema di consolidamento con pressa a doppio nastro

Queste tecniche di consolidamento dei prepregs in laminati piatti si deve considerare un metodo per la realizzazione non di prodotti finiti ma di semilavorati da utilizzare in tecniche di realizzazione di parti finite, quali l'autoclave molding, il diaphragm forming, compression molding e rollforming, che vengono trattate di seguito. Almeno le ultime tre di queste tendono a fornire migliori proprietà del composito se il materiale di partenza è almeno completamente consolidato piuttosto che consistente in una pila di prepreg non consolidati.

Autoclave moulding

Nell'autoclave molding, i prepreg sono depositi su di uno stampo di forma, il che comporta che già durante la deposizione il componente riceve più o meno la sua forma finale. Questo lay-up può essere realizzato manualmente o con qualche forma di attrezzatura di lay-up automatizzato. La pila di prepreg depositi sono poi sottoposti al sacco a vuoto allo stesso modo con cui lo erano i prepreg termoindurenti, ad eccezione del fatto che le temperature del processo sono molto più alte e quindi i comuni materiali utilizzati per la realizzazione del sacco non possono essere utilizzati. La pila di prepreg è compattata e consolidata in un autoclave in un tempo di alcune ore; il consolidamento e lo stampaggio conseguenti vengono realizzati simultaneamente.

Inizialmente usato in ambito militare, il consolidamento in autoclave è stato usato estensivamente. Anche se tecnicamente fattibile nella realizzazione di una grande varietà di componenti di aeromobili, questa tecnica non ha avuto un successo commerciale rilevante in quanto non sembra offrire vantaggi di processo rispetto all'utilizzo di materiali termoindurenti. L'unico motivo di scelta di questo tipo di tecnologia è quello di sfruttare le caratteristiche peculiari dei materiali termoplastici, in particolar modo l'ottimo comportamento all'impatto ed al danneggiamento.

Diaphragm forming

Può essere considerata come derivante dall'autoclave molding. La principale caratteristica consiste nella formabilità più profonda e nella maggior complessità geometrica stampabile. Il materiale di partenza è prima posizionato tra due diaframmi flessibili. I diaframmi, ma non il materiale grezzo, sono clampati attorno all'intero perimetro, usando un telaio di clampaggio, e poi l'aria tra i diaframmi è evacuata.

In una versione di questa tecnica, l'insieme diaframmi-materiali impilati sono messo in un forno e riscaldati fino alla fusione della matrice. La pila è rapidamente posizionata su di uno stampo femmina, ed è realizzato vuoto nello spazio racchiuso tra il diaframma inferiore e lo stampo oppure è applicata pressione sul diaframma superiore in modo da forzare il materiale a conformarsi allo stampo (Fig. 2.38). Dal momento che lo stampo è adeguatamente raffreddato, il componente solidifica velocemente subito dopo il contatto con lo stampo. Con questa tecnica il tempo di formatura è misurato in termini di secondi e del ciclo in minuti (escludendo il preriscaldamento).

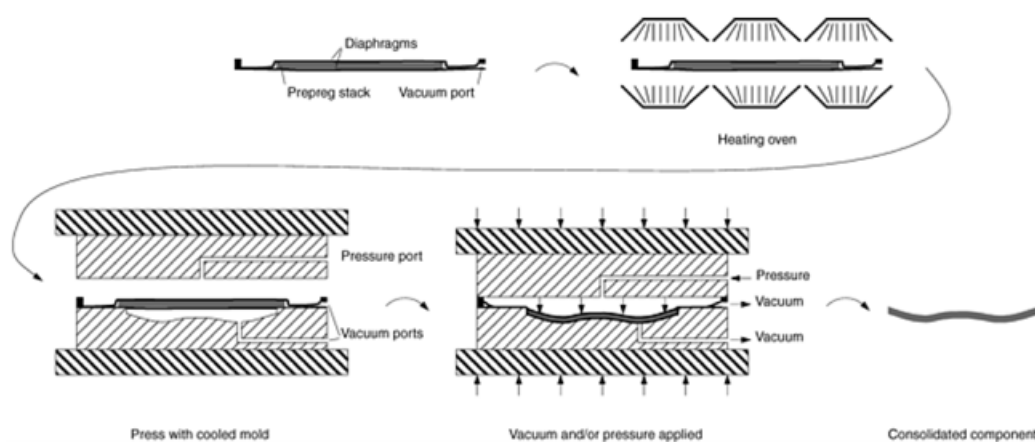


Figura 2.38: Schema di diaphragm forming in pressa di composito termoplastico

In un'altra versione, la pila di diaframmi-materiali è fissata all'estremità di uno stampo femmina a parete sottile e l'intero assemblaggio è piazzato all'interno di un'autoclave. Dopo la seguente evacuazione di aria tra i diaframmi, l'atmosfera interna all'autoclave è riscaldata fino alla fusione della matrice, dopo di che il vuoto sotto al diaframma inferiore e la pressione sopra a quello superiore fanno sì che il materiale si conformi allo stampo (Fig. 2.39).

Quando la formatura è completa, la temperatura nell'autoclave si riduce fino alla solidificazione del componente. Con questa tecnica la formatura dura solo pochi minuti, ma il tempo completo di ciclo è di circa un'ora o più. Questa versione del diaphragm forming permette lo stampaggio di geometrie più complesse rispetto alle versioni precedentemente descritte, ma i tempi di formatura sono molto più lunghi.

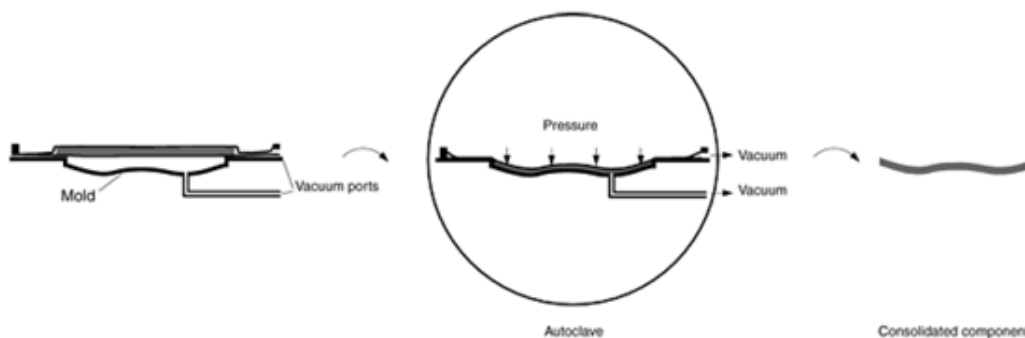


Figura 2.39: Schema di diaphragm forming in autoclave di composite termoplastici

Compression Moulding Semistrutturale

Per i materiali polimerici senza rinforzo, con termoformatura e compression moulding si indicano due processi nettamente distinti. Con termoformatura si indica il processo in cui una lastra di materiale plastico preformata è riscaldata allo stato molle, solitamente fino ad alcuni gradi sotto alla sua temperatura di transizione vetrosa o punto di fusione, e viene pressata con una relativamente piccola pressione dentro o sopra un semistampo raffreddato e lasciato in posizione fino al raffreddamento e

consolidamento. Per il vacuum forming la pressione differenziale è dell'ordine di 0.1 MPa, per pressure forming è dell'ordine di 1 MPa. Con compression moulding si indica il processo che parte da materiali polimerici quali UHMWPE, PTFE. Questi materiali sono di solito caratterizzati da grande viscosità anche a temperature di centinaia di gradi sopra la temperatura di fusione o di processo. Un polimero di questo tipo è compresso come una polvere in una preforma, scaldato in un forno a convezione alla temperatura di processo e trasferito ad una pressa per compression moulding dove è compressato sotto stampo e controstampo caldi. Tipiche pressioni di compressione sono 7-35 MPa. Lo stampo è poi raffreddato finché la temperatura della parte formata torna sostanzialmente sotto la temperatura di processabilità del polimero.

Per polimeri fibrorinforzati il confine tra la compression moulding e la termoformatura si confonde. Frequentemente il processo di formatura di lastre in composito è semplicemente chiamato stampaggio. Riempitivi e fibre discontinue rendono più rigido il polimero e questo fa sì che anche ad elevate temperature siano richieste forze notevolmente maggiori per formare il composito dallo stato piano al prodotto finito. Il processo può essere realizzato o da stampo e controstampo rigidi, o da forza idraulica usando films di alluminio superplastico o poliammide, per sostituire la forza pneumatica quando la pressione differenziale di formatura supera 1 MPa. Il polimero fibrorinforzato, dall'altro lato, non può essere scaldato alla stessa temperatura di formatura del polimero non rinforzato senza che avvengano drammatici collassi delle celle. Come risultato i polimeri fibrorinforzati sono formati a temperature sostanzialmente inferiori della temperatura di formatura dei polimeri non rinforzati. Forze meccaniche, utilizzando stampo e controstampo, sono utilizzate per formare la lastra di polimero rinforzato nel prodotto finito. Tipicamente il rapporto tra modulo elastico del polimero alla temperatura di formatura e la pressione applicata $E(t)/P$, deve essere compreso tra 2 - 10 con un valore di 5 tipico per la tradizionale termoformatura. A 200°C il modulo di PEA non rinforzato è di 2 MPa. La pressione richiesta per la termoformatura di questo polimero è di circa 0.4 MPa. Per un PEA rinforzato con il 30% in peso di fibra di vetro il modulo è di 7 MPa e la richiesta pressione di formatura è di 1.4 MPa. Utilizzare pressione pneumatica a questi livelli è ancora possibile, ma è preferibile l'utilizzo di formatura meccanica. In molti casi il modulo elastico del composito esibisce una dipendenza alla temperatura simile al modulo elastico delle matrici polimeriche con valori isotermici che aumentano monotonicamente con l'aumentare del contenuto di fibra.

La termoformatura è un processo di generazione di superfici. L'area totale della superficie del prodotto finito è molto maggiore della superficie della lastra di partenza. Il metodo dominante di generazione delle superfici è lo stretching biassiale del polimero allo stato solido molle. La forma della curva tensione-deformazione in funzione della temperatura della lastra allo stato molle è la chiave della realizzazione del processo di formatura. Tipicamente la pendenza iniziale della curva, l'aumento di modulo elastico, il punto di snervamento spariscono e l'allungamento a rottura decresce rapidamente con l'aumentare del contenuto di rinforzo.

Questo implica che la formatura di compositi termoplastici richieda alte temperature, forze sostanziali e le parti così prodotte sono limitate alle formature poco profonde.

Le tecniche di compression moulding di materiali compositi in matrice termoplastica possono

essere differenziate in base al fatto che coinvolgano la maggiorparte del materiale nel flusso per riempire lo stampo oppure se il materiale sia predominantemente deformato per conformarsi allo stampo. I GMT permettono il fluire del materiale in quanto non sono presenti gli ostacoli delle fibre lunghe. All'opposto prepreg rinforzati con fibre continue ed allineate in tessuto non possono fluire nella direzione delle fibre senza fratturare le stesse, il che è di solito inaccettabile.

Per quanto riguarda la prima tipologia di materiali numerose sono le applicazioni di medio-bassa rilevanza strutturale che ad oggi rappresentano l'applicazione più largamente utilizzata di materiali compositi nel settore automotive. Tipicamente vengono utilizzate preforme come materiali di partenza e le parti finite vengono stampate in stampi e controstampi di metallo che danno la forma finale al pezzo. Le tre principali categorie di materiali che sono utilizzati in compression molding semistrutturale sono tre tipi di preimpregnati:

- Glass-fiber-mat-reinforced in matrice termoplastica (GMT)
- Long-fiber-reinforced in matrice termoplastica (LFT)
- Sheet molding compounds (SMC) (in matrice termoindurente)

Questo tipo di tecnologie sono tipicamente utilizzate per pannellature e componenti semistrutturali quali supporti di batteria (Fig. 2.40), supporti semistrutturali del frontale (Fig. 2.41 Ford Galaxy), non sono in grado di fornire le caratteristiche di performance strutturali che sono richieste per le applicazioni telaistiche in studio.

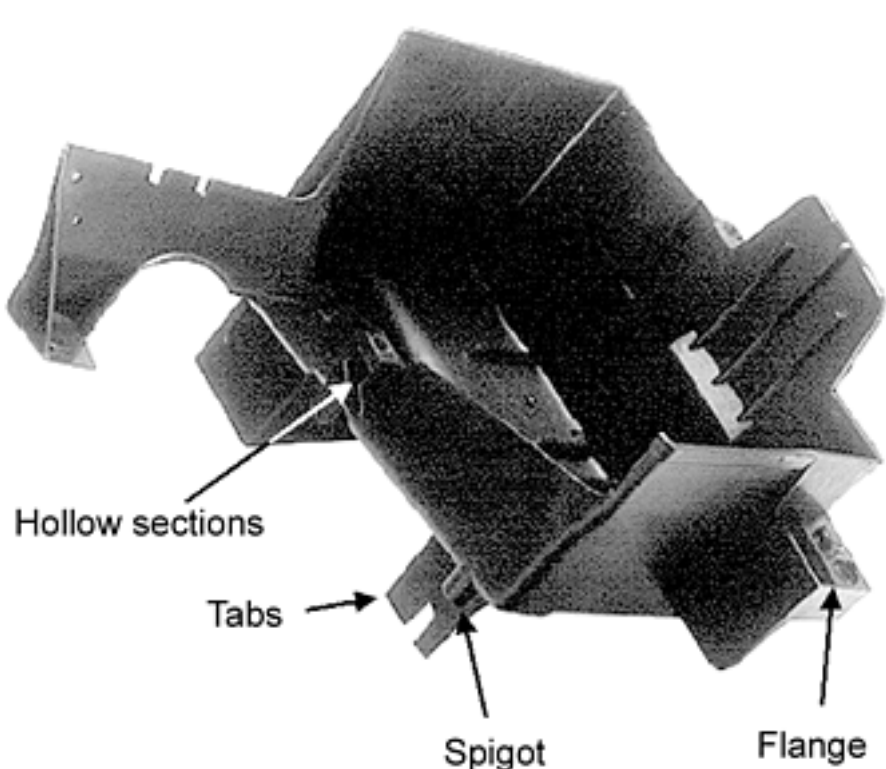


Figura 2.40: Supporti batteria



Figura 2.41: Frontale

Tipicamente polimeri contenenti nonwoven continuous fiber mat e short e long-fiber chopped fiber mat sono formabili con stampo e controstampo.

Compression Moulding Strutturale (Thermoforming)

Per applicazioni strutturali di compression moulding di materiali compositi in matrice termoplastica ad elevatissime caratteristiche meccaniche è necessario rivolgersi alla termoformatura di preforme compattate che hanno rinforzo sotto forma di tessuto. Il processo in questione è di difficile realizzabilità e solo negli ultimi anni alcune aziende lo stanno mettendo appunto. La difficoltà del processo sta nel fatto che compositi contenente rinforzo sotto forma di tessuto sono difficilmente formabili in quanto l'estensibilità della lastra è talmente limitata che anche parti con formature poco profonde non possono essere formate senza delle sostanziali migrazioni di polimero (lo squeezing della matrice polimerica dall'infastellatura di fibre è chiamata percolation), compression buckling, raggrinzamenti e rottura delle fibre quando sono utilizzate tecniche di stampaggio standard. E' ben noto che instabilità, raggrinzamenti e ripiegamenti sono minimizzati tenendo la lastra sotto tensione durante il processo di formatura. Inoltre, per compositi con limitata estensibilità, il materiale che andrà a comporre la forma termoformata deve venire delle regioni esterne. La chiave del processo è garantire la tensione sufficiente per minimizzare i raggrinzamenti ma non eccessiva per non strappare la lastra rammollita.

La quantità di deformazione meccanica della lastra rinforzata non è l'unico obiettivo e preoccupazione quando si va a formare una lastra. La Fig. 2.42 mostra le importanti interazioni fibra-matrice che avvengono localmente durante la termoformatura del composito.

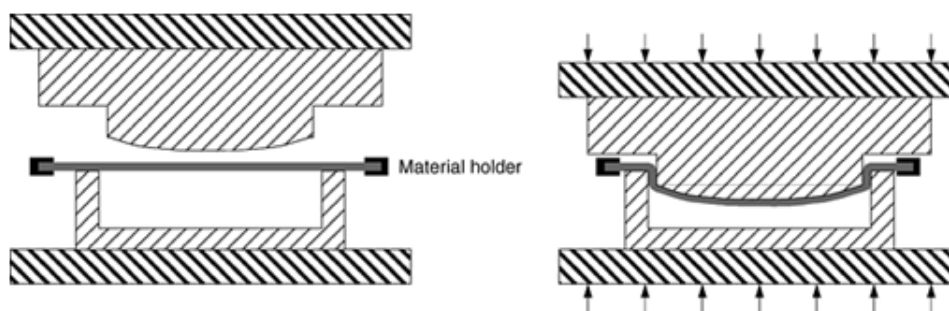


Figura 2.42: Interazioni fibra-matrice

Taglio interstrato, taglio e slittamento e rotazioni interlaminari sono effetti locali degli sforzi che interessano le fibre. Localmente la resina fluisce tra le fibre, gli affastellamenti di fibre e strati permettono locali distorsioni della matrice. La percolation e lo squeeze del flusso della matrice sono effetti predominanti nel comportamento della resina. Vuoti e delaminazione sono microdifetti che sono attribuiti all'interazione fibra-matrice durante la formatura.

Thermoforming + Injection Moulding

Thermoforming + injection moulding è una tecnologia che a livello sperimentale si propone come soluzione per la realizzabilità di nervature di rinforzo su parti in materiale composito termoformato con rinforzo sotto forma di tessuto. La tecnica consiste nel fare seguire alla normale termoformatura in stampo del componente l'iniezione di resina termoplastica nei vuoti della geometria delle nervature richieste ricavati nello stampo stesso. In questo modo vengono realizzati dei rinforzi sotto forma di nerve in materiale plastico, prive di rinforzo, che possono dare notevoli vantaggi dal punto di vista dell'irrigidimento della struttura, ma su cui non si può fare affidamento per applicazioni di carichi importanti quali quelli di tipo strutturale.

Deep Drawing

Durante la formatura profonda il materiale che deve essere processato viene montato su di un telaio che lo tiene in tensione finchè la formatura non è completata. Quando il materiale fuso lascia il preriscaldatore viene posto su di uno stampo femmina costituito da un'intelaiatura per la forma del prodotto finale progettato (Fig. 2.43). Uno stampo maschio poi rapidamente punzona il materiale rammollito attraverso il telaio e da quando lo stampo maschio viene raffreddato, il materiale rapidamente solidifica.

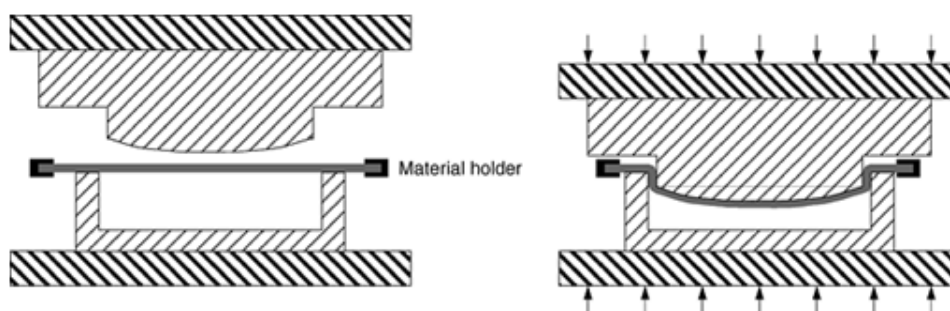


Figura 2.43: Schema di Deep drawing

Roll forming

Nel roll forming un certo numero di coppie di rulli consecutivi, normalmente quattro o più, gradualmente deformano il materiale grezzo fuso alla forma desiderata (Fig. 2.44). I rulli che vengono mossi non sono normalmente riscaldati ed essi di conseguenza raffreddano il componente. Il roll forming

è potenzialmente in grado di realizzare ogni assetto costante di sezione trasversale ed i componenti possono essere curvati, se desiderato.

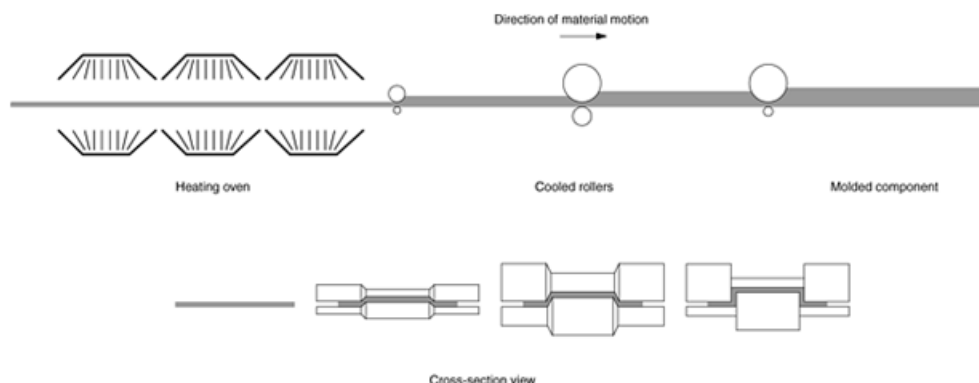


Figura 2.44: Schema di Roll forming

Bladder moulding

Il processo di bladder moulding viene utilizzato per la realizzazione di prodotti cavi per mezzo di un tessuto permeabile interno pressurizzato che compatta il materiale grezzo contro uno stampo esterno (Fig. 2.45). Il materiale grezzo in forma di treccia cava di yarn intrecciati viene drappeggiata sul materiale per trasudazione ed è posta nello stampo che viene chiuso. Il trasudante viene poi pressurizzato e lo stampo viene riscaldato per fondere le matrici fibrose. Quando la matrice è fusa ed il rinforzo completamente impregnato, lo stampo viene raffreddato mantenendo la pressione nella camera d'aria. La temperatura di modellamento serve solamente ad essere ridotta fino a quando il composito è dimensionalmente stabile. Il che significa che cicli successivi di riscaldamento non devono cominciare dalle condizioni ambientali, riducendo così il tempo di ciclo e necessità energetiche.

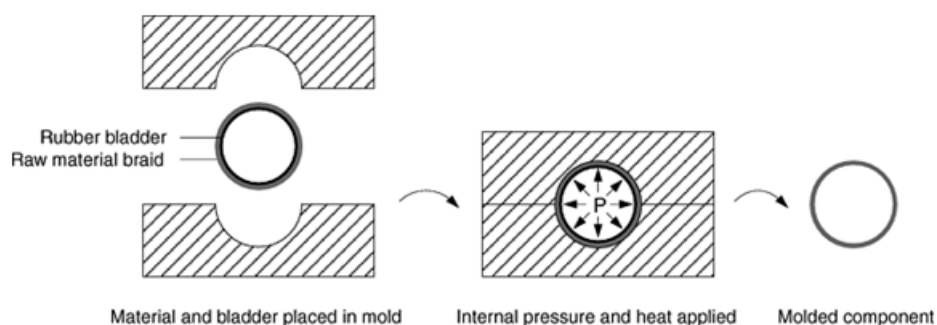


Figura 2.45: Schema di Bladder Molding

Liquid moulding

I processi di modellamento liquido con cui si possono produrre compositi a matrice termoindurente a fini strutturali, che includono il modellamento per trasferimento di resina (RTM), l'infusione a vuoto ed il modellamento per iniezione (SRIM), tutti richiedono che la matrice abbia una viscosità molto

bassa per permettere la impregnazione del rinforzo presente nello stampo. Dato che le matrici termoplastiche completamente polimerizzate hanno una viscosità di fusione molto alta, non è possibile un adattamento diretto delle tecniche di modellamento convenzionale con matrici liquide termoindurenti. (Nel modellamento ad iniezione, le fibre corte sono già intimamente mescolate con la matrice termoplastica completamente polimerizzata, e la miscela viene iniettata nello stampo vuoto). Comunque, con le matrici termoplastiche polimerizzabili in situ, il modellamento liquido può essere realizzato dato che la polimerizzazione può essere rimandata fino a che il rinforzo è stato completamente impregnato; la Fig. 2.46 schematicamente illustra questo tipo di processo.

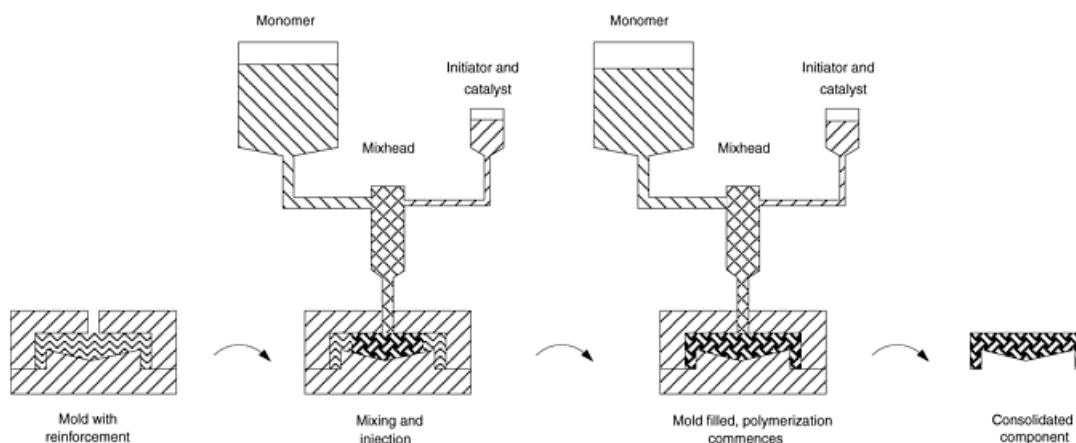


Figura 2.46: Schema di liquid molding con matrice termoplastica

Filament winding

La maggior parte delle possibilità del filament winding vengono rappresentate nella Fig. 2.47. Il nastro di prepreg viene preriscaldato lungo il suo percorso verso il mandrino ruotante. Al punto di contatto, lo strato precedentemente avvolto viene riscaldato ed il prepreg subentrante viene spesso esposto ad un ulteriore forte riscaldamento. Per assicurare un buon consolidamento, entrambe le superfici devono essere fuse quando vengono poste a contatto. Strumenti di riscaldamento che sono stati utilizzati con successo includono: cannoni ad aria calda alimentati a gas, a riscaldatori ad infrarossi, laser, e a fiamme libere. Per compensare la bassa conduttività termica delle matrici termoplastiche, può essere necessario che il preriscaldamento a forno debba essere abbastanza lungo, e che anche il mandrino debba essere riscaldato.

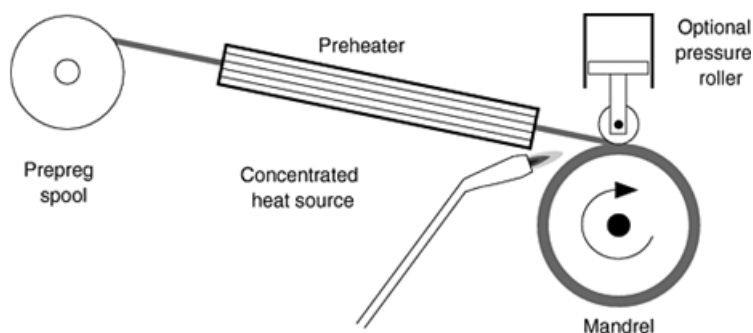


Figura 2.47: Schema di filament winding con matrice termoplastica

Per tutto il tempo che vengono avvolte superfici convesse, può essere sufficiente utilizzare una retrotensione sul prepreg come solo mezzo di compattamento. Comunque, dato che il nastro di prepreg può essere consolidato in linea in una frazione di secondo, superfici piatte o concave possono essere avvolte, senza sacrificare la qualità del consolidamento, utilizzando nastri a ponte, purché venga fornita una sorgente di pressione esterna, come un rullo a pressione o una sagoma di scorrimento. Considerando a parte la possibilità di permettere un avvolgimento concavo, il consolidamento on line elimina virtualmente la necessità di seguire il percorso geodetico per evitare lo slittamento, permettendo così una libertà molto maggiore nelle geometrie e negli orientamenti dei rinforzi del filament winding con matrici termoindurenti.

Inoltre, la consolidazione on line può comportare livelli considerevolmente più bassi di stress indotti dalla temperatura di quelli provocati se l'intero componente simultaneamente affrontasse il ciclo termico passando dalla temperatura di processazione a quella ambientale. E' così, almeno teoricamente, possibile creare pareti di qualsiasi spessore senza preoccuparsi troppo per gli stress residui indotti dalla temperatura.

Poiché la matrice viene fusa in così poco tempo, è naturale che i prepreg completamente fusi e impregnati conferiscano ai componenti proprietà migliori di quelle conferite da yarns mescolati o impregnati di polvere, sebbene tutte le forme materiali siano state usate con successo. Velocità di avvolgimento a cerchio, maggiori di 1 m/s, sono state realizzate col laser e col riscaldamento a fiamme libere usando prepreg fusi impregnati, ma normalmente le velocità sono più basse.

Tentativi di impregnazione on line con polvere di polimeri e di impregnazione liquida con matrici termoplastiche polimerizzabili in situ sono stati fatti ma non sono stati utilizzati in modo diffuso.

Pultrusione

Un impianto base di pultrusione con matrice termoplastica è schematicamente illustrato nella Fig. 2.48. Il materiale grezzo in prepreg è spinto entro un preriscaldatore e poi entra in uno stampo riscaldato, che ha una rastremazione dove il materiale prende gradualmente forma fino alla forma finale di sezione trasversa prima che esso sia consolidato in uno stampo freddo. Sebbene siano stati provati stampi ad un solo pezzo, è più comune che almeno due separati stampi vengano usati per permettere gradienti di temperatura più elevati. Il consolidamento è un processo graduale che parte

nella rastremazione dello stampo riscaldato e continua fino a che lo stampo freddo solidifica la matrice. Il tempo di consolidamento è perciò funzione della lunghezza dello stampo, della temperatura dello stampo e della velocità di trazione. Mentre sono state riportate velocità vicine a 100 mm/sec (4in./s) per pultrusione di semplici componenti, usando prepregs fusi-impreganti, velocità di un ordine di grandezza più basse sono molto comuni. Si dice che stampi vibranti ad ultrasuoni permettano velocità più alte di trazione quando prepregs fusi-impreganti vengono usati.

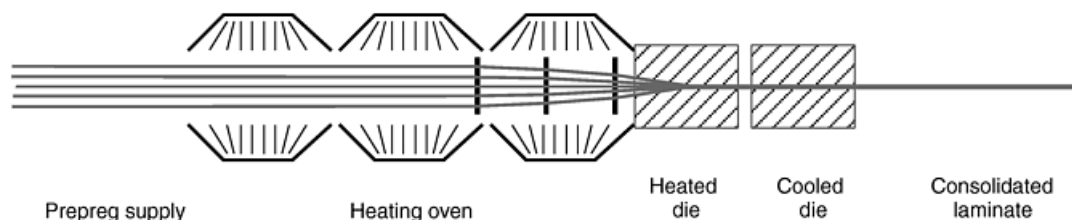


Figura 2.48: Schema di pultrusione con matrici termoplastiche

Tutte le forme di prepreg sono state provate ma c'è un piccolo dubbio che i prepreg fusi impregnati diano origine alle migliori proprietà dei componenti e alla più alte velocità di trazione per tutto il tempo che il rinforzo è essenzialmente longitudinale. Per includere rinforzi non longitudinali può essere necessario impiegare forme materiali tessute e intrecciate, e queste sono più facilmente utilizzabili se basate su yarns impregnati da polvere e mescolati. Al fine di migliorare l'economicità del processo, il rinforzo dovrebbe naturalmente venire impregnato idealmente come parte del processo in analogia con la tecnica per matrici termoindurenti. Mentre vari metodi sono stati provati, l'uso nella pultrusione ad iniezione di matrici termoplastiche polimerizzabili in situ, è tecnicamente una soluzione sperimentata che sta per essere commercializzata. (Fig. 2.49)

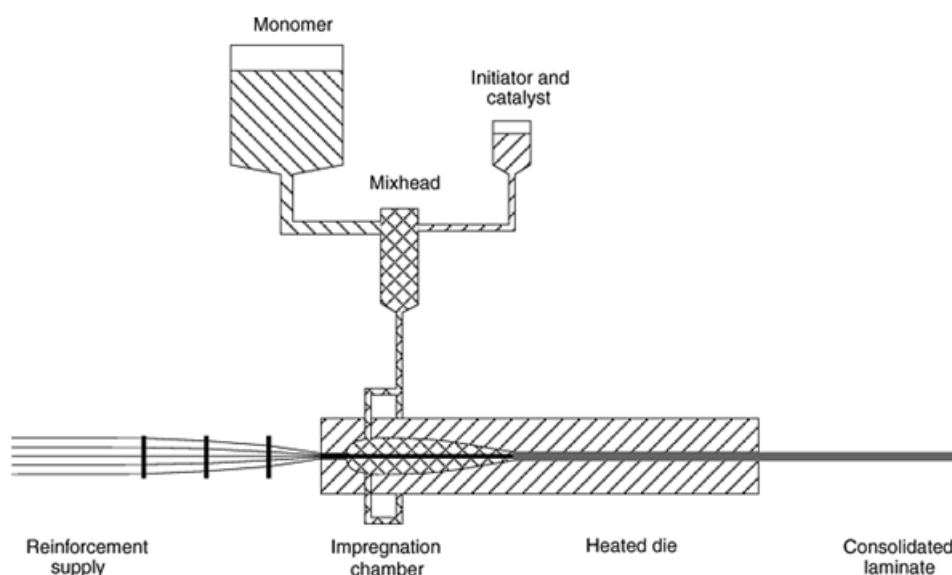


Figura 2.49: Schema di pultrusione ad iniezione con matrici termoplastiche

Postforming

Il postforming localizzato offre un tuttora semplice mezzo per fare limitati cambiamenti a compositi con matrici termoplastiche già consolidate. Per esempio, fogli e stock di barre possono essere piegati, appiattiti e così via per mezzo di riscaldamento localizzato con conseguente modellamento. Nonostante il fatto che se fibre di rinforzo continue vengono coinvolte esse probabilmente stanno per deformarsi o per rompersi, linee di riscaldamento e conseguenti piegature di fogli e anche di pannelli a sandwich, si sono dimostrati attuabili commercialmente in alcune applicazioni.

2.10.5 Osservazioni

Mentre le tecniche per produrre compositi con matrici termoindurenti posso essere considerate sufficientemente mature, la maggior parte delle tecniche per realizzare compositi con matrici termoplastiche sono considerevolmente meno sviluppate, e il campo per un miglioramento ed un rinnovamento tecnico è vasto. Le tecniche descritte sopra sono state tutte tecnicamente verificate, ma in molti casi (con l'eccezione dello stampaggio a compressione di GMT e della tecnica prepreg-based) esse non sono risultate essere ad essere economicamente competitive il che è generalmente dovuto al costo proibitivo dei preppregs in matrice termoplastica. Da questa punto di vista, la introduzione di matrici termoplastiche relativamente facilmente polimerizzabili in situ, offre una opportunità molto attraente, che probabilmente porterà ad una trasformazione dell'industria. Mentre continueranno ad esserci mercati nicchia per compositi costruiti con materiali a matrici termoplastiche completamente polimerizzate, matrici termoplastiche polimerizzate in situ avranno una chance per conquistare ampi mercati dato che prezzo e tempi di produzione sono competitivi rispetto alle alternative costituite dalle matrici termoindurenti.

Capitolo 3

Caratterizzazione Sperimentale di laminati compositi

3.1 Introduzione

La realizzazione di materiali compositi in matrice polimerica ha da sempre avuto come fondamento il processo di laminazione. L'unico processo basato su un principio di deposizione alternativo, che negli anni ha conquistato il suo spazio nella realizzazione di corpi assialsimmetrici quali serbatoi ed alberi, è stato il filament winding. Il mercato dei materiali compositi tutt'oggi si basa sul processo di laminazione di rinforzi di tipo woven, lasciando ben poco spazio a materiali di tipo intrecciato o woven 3D.

L'attenzione delle normative circa la caratterizzazione dei materiali compositi si è di conseguenza posta sullo studio delle proprietà del laminato classico, appoggiandosi sulla teoria classica dei laminati (TLC).

La caratterizzazione cosiddetta "classica" è quindi applicabile a tutti quei materiali compositi realizzati attraverso il processo di laminazione, e ad oggi costituisce un campo di indagine maturo e consolidato e trattato esaustivamente in letteratura.

Lo studio delle proprietà meccaniche di corpi assialsimmetrici realizzati con la tecnologia di filament winding è anch'esso normato e consolidato, e appoggiandosi anch'esso sulla TLC si basa su prove sperimentali sostanzialmente diverse da quelle riservate a compositi laminati piani, a causa della natura curva dei provini estraibili dal pezzo assialsimmetrico.

Al contrario lo studio delle proprietà di materiali realizzati con tecnologie di braiding 3D, overbraiding, woven 3D ed in generale con tecniche di deposizione di rinforzo alternative, costituisce un campo di indagine ancora poco consolidato e la normativa vigente si appoggia alla caratterizzazione classica.

Le parti realizzate con quest'ultimo tipo di tecnologie, diverse da quelle di laminazione, sono di solito prodotti a cui si richiedono elevatissime performance strutturali in campi quale l'aerospaziale e l'aeronautico. Per questo tipo di prodotti è quindi solita una procedura di caratterizzazione specifica

per ogni tipo di sistema materiale-tecnologia magari diversa da azienda a azienda.

Si è eseguita una caratterizzazione classica completa, su due tipologie di materiali, termoidurenti e termoplastici, per creare un database utile in fase di progettazione e calcolo.

3.1.1 Proprietà meccaniche e fisiche di interesse del laminato classico

Per la caratterizzazione delle proprietà meccaniche di un composito o lamina è necessaria la conoscenza delle 4 costanti elastiche (E_L , E_T , G_{LT} , ν_{LT}) e delle 5 resistenze (in trazione σ_{LU} , σ_{TU} , in compressione σ'_{LU} , σ'_{TU} , e a taglio nel piano τ_{LTU}). Altra grandezza caratterizzante nel caso di compositi laminati è la resistenza a taglio interlaminare. Per la determinazione di queste grandezze si carica il provino nel piano [64,65]. Per quanto riguarda le proprietà a flessione è preferibile non ricavarle dalle prove a trazione, ma effettuare delle prove a flessione. E' desiderabile che tutte le proprietà vengano determinate per una singola strato o lamina del composito, per poi in seguito, con la teoria dei laminati, calcolare le proprietà del laminato. Considerazioni pratiche però sconsigliano la costruzione di provini con lamina singola, e per questo è necessario condurre test su provini multistrato ed usare la teoria approssimata della laminazione per *ricondere i risultati in termini di proprietà della lamina*. Altre caratteristiche da valutare sono la resistenza a frattura e le proprietà di impatto.

Durante l'applicazione del carico nei materiali compositi il danneggiamento può iniziare già con carichi molto bassi, per poi crescere progressivamente fino alla frattura. L'*influenza dell'accumulo del danno* per la determinazione del *comportamento stress-strain attuale* è molto rilevante in relazione all'analisi e progettazione di componenti strutturali in materiale composito e la identificazione e caratterizzazione dell'accumulo del danno è fondamentale.

Le procedure standard per il testing di materiali compositi sono riportate nelle norme ASTM (American Society for Testing and Materials).

3.1.2 Differenze tra la caratterizzazione di materiali compositi e materiali isotropi

I laboratori che sono esperti nella caratterizzazione di materiali isotropi non è detto che siano automaticamente qualificati per raggiungere risultati validi qualora testino materiali compositi. Le differenze tra i due tipi di materiali sono molteplici.

Anisotropia del materiale

Una prova a trazione uniassiale, per esempio, non produce mai uno stato tensionale puramente uniassiale nell'intero provino; stati di tensione tridimensionali esistono sempre in corrispondenza di discontinuità e agli afferraggi. La combinazione di tensioni multiassiali e resistenze minori lungo le diverse direzioni porta a rotture premature o errate, le quali abbassano le proprietà misurate e aumentano la dispersione dei dati. E' necessaria grande attenzione nel disegno del provino e nella realizzazione del test per minimizzare il problema.

Modalità di rottura complicate e non intuitive

Test realizzati correttamente dovrebbero portare a modalità di rottura previste, di cui si vuole studiare la natura. Ma in alcuni test sono possibili diverse modalità di rottura, anche se eseguiti correttamente. Alcune modalità di rottura possono essere catastrofiche (quale è quella del test a trazione uniaxiale) e l'osservazione della geometria e delle caratteristiche del cedimento può evidenziare problemi nella realizzazione della prova o nella preparazione del provino. Per altri test, quali per esempio prove in compressione, è difficile validare la buona realizzazione del test solamente dall'osservazione macroscopica della frattura.

Inomogeneità non intenzionali

Al contrario della maggior parte dei materiali isotropi che vengono prodotti in semilavorati e poi formati per ottenere il prodotto finito, i materiali compositi sono in prevalenza consolidati nella forma finale del materiale allo stesso tempo in cui il prodotto finale viene fabbricato. Questo introduce variabili aggiuntive al processo e al materiale. Per esempio variazioni locali di frazione in volume di fibra sono comuni, specialmente in corrispondenza di spigoli e raggi. Cambiamenti di orientazione di fibra sono altri esempi di inomogeneità non intenzionale, per esempio un tessuto che dovrebbe avere orientazione 0-90°, in corrispondenza del drappaggio di superfici complesse potrà subire elevatissime variazioni di orientazione dei due intrecci.

3.1.3 Approccio Building-Block per la validazione strutturale di parti in materiale composito

Il processo generico di validazione strutturale è definito in MIL-HDBK 17 "structural substantiation". La presenza di numerose variabili in gioco nell'effettuazione dei test, combinata con la grande dispersione di dati che implicano i test standard, portano ad una diffusa sfiducia nella realizzazione della validazione strutturale che si basi solamente sull'analisi.

Più spesso è utilizzata una combinazione di analisi e testing, in cui i risultati di una vadano a validare l'altra. Questo approccio è definito approccio "building-block" di sviluppo del testing.

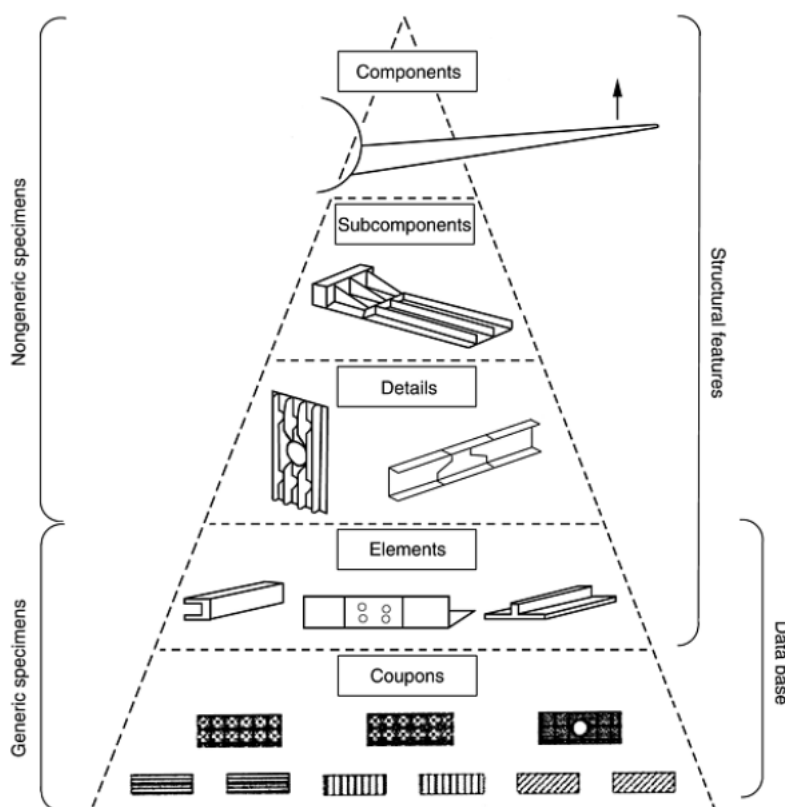


Figura 3.1: Piramide building-block

La piramide in Fig. 3.1 illustra il concetto di approccio buildig-block. Ai livelli inferiori vengono determinate le proprietà di base dei materiali realizzando una grande quantità di prove su provini. Ad ogni livello successivo progressivamente vengono costruite e testate strutture più complicate mentre i modi di rottura ed i carichi relativi vengono predetti in base alle analisi effettuate ai livelli inferiori. Al crescere della complessità delle strutture, il numero di repliche (stessi provini alle stesse condizioni) ed il numero di condizioni di prova vengono ridotte. Al culmine della piramide si trova la singola prova sul componente in full-scale.

Le prove relative agli alti livelli non sono quasi mai realizzate alle peggiori condizioni ambientali possibili. I dati ottenuti dai livelli inferiori possono essere utilizzati per ottenere dei valori di compensazione per le diverse condizioni di prova, che possono essere applicati ai carichi delle prove ai livelli superiori, ad esempio per quanto riguarda elevate temperature. In modo simile altri test di basso livello possono fornire informazioni utili per quanto riguarda il comportamento a fatica e valori di compensazione per le prove a più alto livello.

L'approccio buildig-block può essere riassunto nei seguenti passaggi:

- Ottenimento dei materiali secondo specifiche che includano controllo delle proprietà fisiche dei costituenti, prepreg, lamine e laminati.
- Determinazione multibatch delle proprietà dei materiali a livello di lamina e laminato, calcolo dei valori statistici di base.

- Selezione, in base al disegno della parte ed ai dati ricavati, di aree critiche e progettazione delle caratteristiche delle successive prove.
- Determinazione, per ogni tipo di prova, della combinazione di carichi/condizioni che si prevede portino ad un certo tipo di modo di rottura. Speciale attenzione deve essere data ai modi di rottura per cui la matrice è più sensibile (quali compressione, taglio out-of-plane, e linee di incollaggio) e potenziali "punti caldi" causati dalla presenza di carichi out-of-plane.
- Progettazione e test di una serie di provini, ognuno dei quali simuli una singola modalità di rottura e condizione di carico/condizioni. Confronto dei risultati dei test con le previsioni analitiche ed aggiustamento dei modelli di analisi o progettazione dei provini se necessario.
- Conduzione di prove a complessità crescente per la valutazione di situazioni di carico complesse con la possibilità di rotture secondo più modalità potenziali. Confronto delle previsioni analitiche ed aggiustamento dei modelli di analisi se necessario.
- Conduzione, se richiesto, di prove statiche e a fatica del componente full-scale per la validazione finale delle azioni interne e dell'integrità strutturale. Confronto con le previsioni da analisi.

3.1.4 Livelli building-block

All'inizio del processo di pianificazione delle prove devono essere prese delle decisioni circa quali livelli testare e quale importanza dare ai singoli livelli. I fattori decisionali comprendono processi di fabbricazione, applicazioni strutturali, consuetudini aziendali, necessità di certificazioni. Mentre per alcune applicazioni è sufficiente un solo livello di testing (per esempio strutture filament-wound non strutturalmente critiche caricate solamente a trazione), la maggior parte delle applicazioni richiedono almeno due livelli di testing, ed è molto frequente la necessità di usarne tre o più.

Test del materiale

Costituenti Test per la valutazione delle proprietà fisiche di singole fibre, forme di fibra, materiali di matrice, e preforme fibra-matrice. Le proprietà fondamentali da valutare sono densità, resistenza a trazione e modulo elastico, secondo le normative ASTM Standard.

Lamina Test per la determinazione delle proprietà dell'insieme di fibra e matrice nella forma di materiale composito (unidirezionale o meno). Le prove per la caratterizzazione dei preimpregnati sono incluse in questo livello, anche se possono anche essere incluse nel livello dei costituenti o in un livello a sé stante. Le proprietà fondamentali sotto studio sono frazioni in volume e peso di fibra, matrice, vuoto, spessore degli strati in cui è avvenuto il trattamento di polimerizzazione, resistenze a trazione e moduli elastici, resistenze a compressione e moduli elastici a compressione, resistenza a taglio e moduli elastici tangenziali. Anche la resistenza a rottura interlaminare è studiata in questo livello, sebbene possa essere testata pure a livello di laminato.

In funzione delle filosofie progettuali e di analisi il livello di lamina può essere considerato o come la fonte primaria di informazioni a livello strutturale o soprattutto come supporto per la conferma e correlazione dell'analisi con i test di livello superiore.

Laminato Test per la determinazione della risposta del materiale composito in date orientazioni del laminato. Le proprietà fondamentali sotto studio includono la resistenza a trazione del laminato e moduli elastici, la resistenza a compressione del laminato e moduli elastici, la resistenza a rottura interlaminare e la resistenza a fatica.

In funzione delle filosofie progettuali questo livello può concentrarsi sulla validazione dell'analisi fatta a livello di lamina per predire le proprietà del laminato, o può essere fonte primaria di informazioni per la pratica progettuale.

Test delle feature strutturali

Test degli elementi strutturali Questo livello valuta la capacità del materiale di tollerare comuni discontinuità del laminato e le capacità del metodo di analisi di prevederne la risposta. Le proprietà fondamentali includono la resistenza a trazione di provini in presenza di fori aperti o chiusi, resistenza a compressione di provini in presenza di fori aperti o chiusi, resistenza a compressione dopo impatto e resistenza delle giunzioni.

Test di dettaglio Discontinuità più complicate e generiche sono valutate in provini speciali di dettaglio strutturale, progettati per riprodurre molti dei comportamenti di configurazioni strutturali che producano stati tensionali tridimensionali.

Test di subcomponenti A questi livelli l'enfasi inizia a spostarsi dall'attenzione sulla singola modalità di rottura alla valutazione generale del comportamento della struttura. Un subcomponente da provare può essere realizzato dalla linea produttiva dedicata o può essere un pezzo di apposita progettazione che includa un certo numero di caratteristiche del tipico subcomponente di interesse.

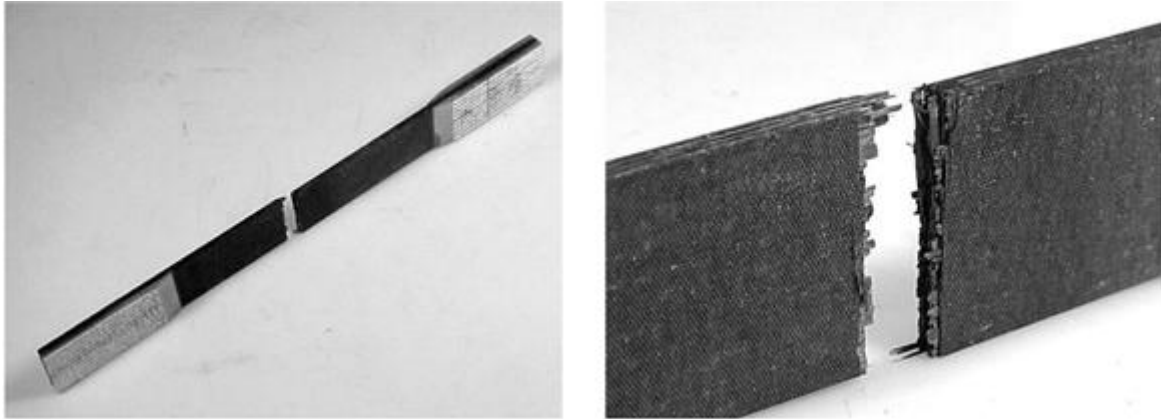
Test del componente full/scale I più alti livelli si occupano di osservare il comportamento e le modalità di rottura di assemblaggi strutturali sempre più complessi. Tipicamente vengono usati i dati provenienti dai livelli inferiori per semplificare le caratteristiche di caricamento e condizioni delle prove.

3.2 Test per la determinazione delle proprietà meccaniche

3.2.1 Proprietà in Trazione

La normativa di riferimento per la prova in oggetto è la ASTM Standard D3039/D3039M-00.

La prova statica a trazione uniassiale è la prova più semplice e più utilizzata per la determinazione delle principali proprietà meccaniche. Esistono diverse tipologie di provini e connessione alle mordacchie, la combinazione migliore è quella con provino straight-sided (cioè dritto senza raccordi ad osso di cane) con end tabs e connessione di tipo serrated-jaw-type (cioè provino integro serrato in mordacchia e non forato e imbullonato).



La norma raccomanda che il provino con fibre parallele alla direzione di applicazione del carico sia largo 12.7 mm e che sia costituito da 6-8 plies, mentre il provino con fibre perpendicolari alla direzione del carico sia largo 25.4 mm e sia costituito da 8-16 plies. La lunghezza della sezione sotto test è di 153 mm.

L'acquisizione dati consiste nella misurazione del carico applicato e della deformazione nelle direzioni parallela e perpendicolare al carico. La deformazione può essere misurata o per mezzo di estensometri o per mezzo di estensimetri (più accurati). E' possibile tracciare facilmente la curva tensione-deformazione. Se il carico è applicato nella direzione longitudinale, la pendenza iniziale della curva rappresenta E_L . Allo stesso modo E_T può essere determinato applicando il carico lungo la direzione trasversale. σ_{LU} e σ_{TU} vengono determinate dalla conoscenza del carico a frattura nei due casi. ν_{LT} è determinato dalla misurazione delle deformazioni parallele e perpendicolari durante il caricamento longitudinale.

Problema del disallineamento

Disallineamenti di pochi gradi tra direzione di applicazione del carico e direzione principale delle fibre causano elevate sottostime dei valori di modulo elastico e resistenza a trazione.

Trasferimento del carico tra end tabs e laminato

E' necessario che gli end tabs siano molto lunghi e sia utilizzato un buon adesivo per poter ripartire nel modo più uniforme possibile il carico che si trasmette a taglio tra tabs e provino.

3.2.2 Proprietà in Compressione

Le norme di riferimento per le prove a compressione sono le seguenti:

- ASTM Standard D695 (for Rigid Plastics)
- ASTM Standard D3410/D3410M-03 (IITRI Test Fixture)
- ASTM Standard D6641/D6641M-01 (Combined Loading Compression CLC Test Fixture)
- ASTM Standard D5467/D5467M-97 (Using sandwich beam)

Attrezzature e prove

La prova a caricamento uniassiale in compressione presenta diversi problemi il maggiore dei quali è l'insorgere di fenomeni di buckling. Per evitare ciò piuttosto che utilizzare supporti laterali è consigliabile utilizzare provini tozzi. Un secondo problema è quello di cedimenti prematuri alle estremità per sfrangiamento, che possono essere evitati annegando le estremità in polimeri o in metalli dal basso punto di fusione. Un altro metodo per risolvere il problema dello sfrangiamento è l'afferraggio delle estremità.

Sono state studiate numerose architetture di attrezzamenti per assicurare il necessario allineamento. Il più comune è il IITRI test fixture. Le normative che descrivono il test method per le proprietà a compressione per provini con sezione di prova non supportata lateralmente con caricamento a taglio, quale il metodo IITRI, sono le ASTM Standard D3410/D3410M-03. Le nuove ASTM Standard D6641/D6641M-01 descrivono il test method che utilizza un caricamento in compressione combinato (CLC). Questo tipo di caricamento presenta alcuni vantaggi.

Misurazioni

La raccolta di dati è simile a quella eseguita per la prova di trazione. La deformazione nella direzione del carico è misurata con compressometri o estensimetri elettrici. Lo spostamento della testa della macchina non è una fonte affidabile a causa degli errori provenienti dal comportamento delle estremità dei provini. La deformazione nella direzione perpendicolare alla direzione di caricamento è misurata con estensometri. Da queste misurazioni è possibile ricavare moduli elastici e di Poisson e può essere ricavata la curva tensione deformazione. Per la determinazione di moduli elastici e di Poisson vengono usualmente utilizzati provini a sezione costante. Per la determinazione delle resistenze a compressione sono spesso usati provini con riduzione di sezione alla mezzeria del provino per innescare il cedimento lontano dalle estremità.

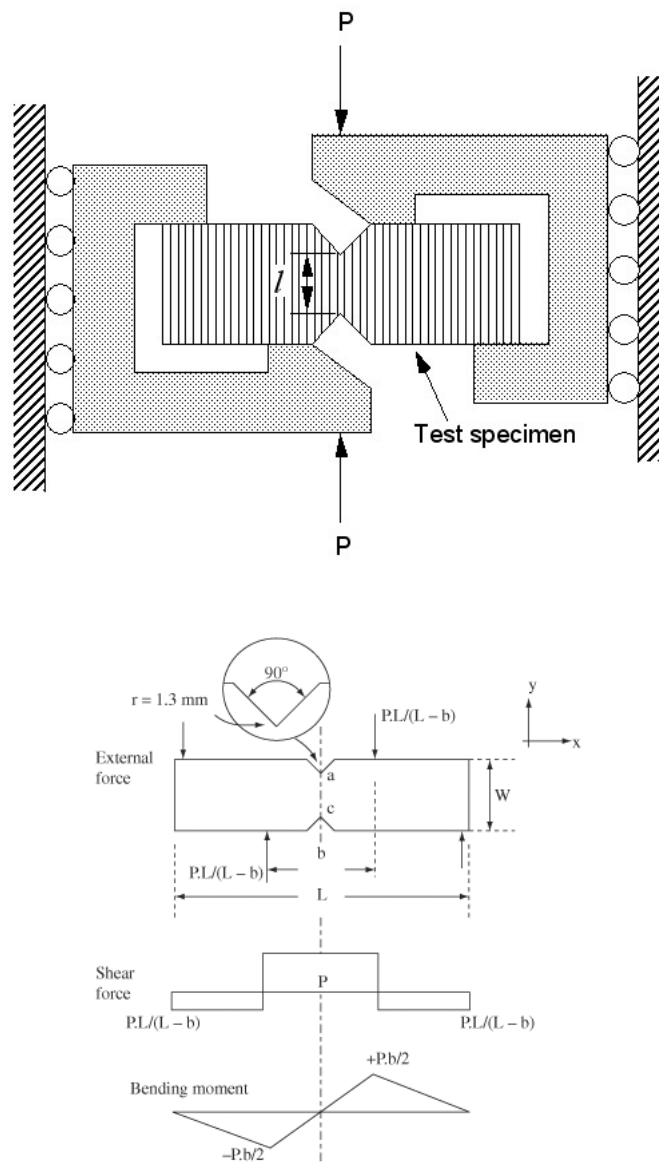
3.2.3 Proprietà a taglio nel piano

La normativa di riferimento per la prova in oggetto è la ASTM Standard D5379/D5379M-98.

Le proprietà determinate con questo tipo di test sono il modulo di taglio G_{LT} e la resistenza a taglio τ_{LTU} . Un provino viene sottoposto a caricamento tale che si produca uno stato di taglio puro e viene misurata la deformazione risultante. I metodi maggiormente utilizzati sono i seguenti:

Test di Iosipescu

Attraverso l'applicazione di due momenti concentrati prodotti da due coppie di forze, nella mezzeria del provino è indotta una forza costante di taglio. Riportiamo lo schema di attrezzamento del provino ed il relativo diagramma delle azioni interne.



Gli intagli a 90° su ogni spigolo del provino producono una distribuzione di tensione di taglio costante lungo la sezione, invece che una distribuzione parabolica che si avrebbe per una trave a sezione costante. Vale:

$$\tau = \frac{P}{wt}$$

Le deformazioni di taglio sono ottenute dalla misurazione della deformazione normale a $\pm 45^\circ$ rispetto alla direzione longitudinale del provino attraverso due estensimetri applicati in mezzeria al centro del provino tra gli intagli.

Per materiali dall'ortotropia molto elevata (alti rapporti E_L/E_T) si verifica una non uniformità nella distribuzione delle tensioni lungo la sezione di prova, il che introduce errori nella determinazione dei valori delle proprietà. Vengono utilizzati fattori di correzione su provini unidirezionali determinati attraverso tecniche FEM o provini cross-ply 0-90°.

3.2.4 Resistenza a taglio interlaminare

Short-beam shear test

La normativa di riferimento per la prova in oggetto è la ASTM D 2344/D 2344M-00.

E' di considerevole interesse valutare la resistenza a taglio interlaminare attraverso test nei quali la rottura del laminato inizi in un modo a taglio. E' noto che un alto rapporto campata-spessore in una prova a flessione di un provino comporti il cedimento per tensione normale massima, senza che intervengano fenomeni di delaminazione. Se il rapporto è abbastanza basso, il cedimento inizia e propagare per rottura interlaminare a taglio, ed il test può essere utilizzato per valutare la resistenza a taglio interlaminare. Il test denominato *short-beam shear test* rappresenta la prova sperimentale maggiormente utilizzata per la valutazione della resistenza interlaminare.

Si osserva che la massima tensione a taglio in una trave si trova al piano medio. Di conseguenza in un short-beam shear test la rottura dovrà avvenire lungo il piano medio della trave tale che la frattura si propaghi parallelamente alla direzione di laminazione. E' da annotare che la validità del short-beam shear test viene meno al momento che un cedimento a trazione delle fibre preceda o sia simultaneo al cedimento a taglio interlaminare.

3.3 Prove sperimentali

3.3.1 Introduzione

Per una caratterizzazione statica completa sono state eseguite quattro differenti prove utili alla determinazione delle proprietà meccaniche del composito.

Per tale campagna di prove sono state scelte due diverse tipologie di materiale per la costruzione dei 128 provini:

1. Cycom 2020-36%-M55J-140-325: Laminato termoindurente con resina epossidica cycom
2. AS4/PPS: Laminato termoplastico con matrice plastica in PPS

I provini a matrice termoindurente sono stati laminati da CPC compositi s.r.l di Modena e tagliati da Zenys Di Franco Venturelli & C. S.N.C., mentre i provini a matrice termoplastica sono stati laminati e tagliati da Fiberforge.

La campagna di prove sperimentali è stata effettuata su una macchina servo-idraulica Instron 8033 con cella di carico di 250 kN calibrata a 25 kN per una maggiore sensibilità nell'acquisizione dei dati.

Le prove di trazione e compressione sono state condotte in controllo di posizione ad una velocità di 0,01 mm/sec, le prove a taglio ad una velocità di 0,03 mm/sec, ed infine le prove a taglio interlaminare ad una velocità di 0,02 mm/sec.

I dati sono stati acquisiti tramite software Station Manager versione 3.1, MTS Corporation.

Per la misura della deformazione nelle prove di trazione e compressione sono stati utilizzati degli estensimetri del HBM con resistenza $350 \pm 0.4\% \Omega$ e gauge factor $+2.02 \pm 0.2$, centrati lungo l'asse del carico.

Per la misura della deformazione nelle prove a taglio sono state utilizzate delle rosette bigriglia Vishay con resistenza $350 \pm 0.4\% \Omega$ e gauge factor $+1.2 \pm 0.2$, centrate lungo l'asse del carico e montate a $\pm 45^\circ$ rispetto a all'asse, come mostrato in figura.

3.3.2 Prove a trazione secondo ASTM D 3039

Per l'esecuzione delle prove a trazione sono state utilizzate apposite mordacchie (Fig.3.2), progettate appositamente per tale test. Le scelte costruttive delle attrezzature in oggetto sono state determinate dall'esigenza di eliminare qualsiasi tipo di flessione dal provino durante l'esecuzione della prova. Il trasferimento del carico avviene attraverso un afferraggio conico che va ad improntare i tabs, quest'ultimi incollati sul provino tramite una resina strutturale.

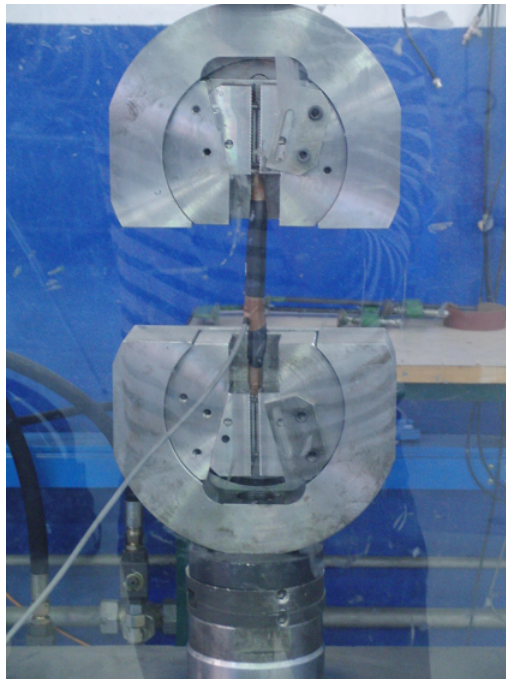


Figura 3.2: Macchina servo-idraulica Instron 8033 con mordacchie

La geometria del provino è illustrata in Fig.3.3.

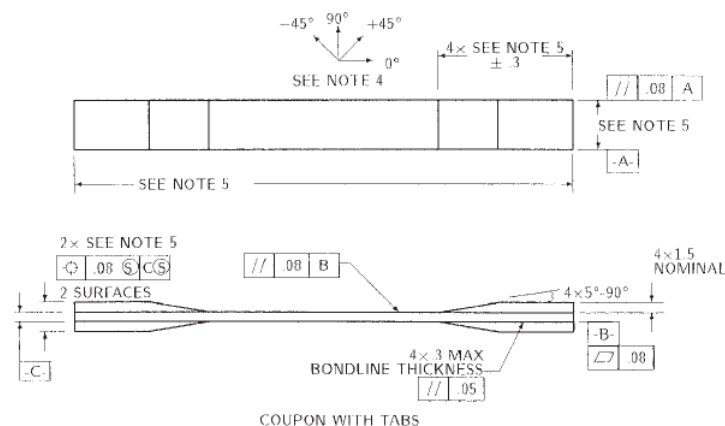


Figura 3.3: Provino a trazione

Il modulo di elasticità E è stato calcolato nel campo di deformazione di 0.002 , cioè fra i $1000 \div 3000 \mu\epsilon$, mentre la resistenza a trazione F^{tu} è stata calcolata considerando il valore massimo del carico. Per alcuni provini, mediante l'utilizzo di estensimetri posizionati lungo la direzione trasversale al carico, è stato calcolato il coefficiente di Poisson fra i $1000 \div 3000 \mu\epsilon$.

Si sono volute testare due diverse tipologie di layup per laminati termoindurenti:

1. Cycom 2020-36%-M55J-140-325, layup $[0/90/\pm 45]_{2s}$: Il materiale utilizzato per la realizzazione dei provini è un laminato unidirezionale costituito da matrice termoindurente, resina epossidica Cycom 2020, e rinforzo in fibra lunga di carbonio disposto in 16 strati con lay-up $[0/90/\pm 45]_{2s}$ di spessore complessivo 2.4 mm.
2. Cycom 2020-36%-M55J-140-325, layup $[0]_7$: Il materiale utilizzato per la realizzazione dei provini è un laminato unidirezionale costituito da matrice termoindurente, resina epossidica Cycom 2020, e rinforzo in fibra lunga di carbonio disposto in 7 strati con lay-up $[0]_7$ di spessore complessivo 1 mm.

Allo stesso modo sono state testate due tipologie di layup per laminati termoplastici:

1. AS4/PPS, layup $[0/90/\pm 45/0/90]_s$: Il materiale utilizzato per la realizzazione dei provini è un laminato unidirezionale costituito da matrice termoplastica, PPS, e rinforzo in fibra lunga di carbonio AS4 disposto in 12 strati con lay-up $[0/90/\pm 45/0/90]_s$ di spessore complessivo 2.4 mm.
2. AS4/PPS, layup $[0]_5$: Il materiale utilizzato per la realizzazione dei provini è un laminato unidirezionale costituito da matrice termoplastica, PPS, e rinforzo in fibra lunga di carbonio AS4 disposto in 12 strati con lay-up $[0]_5$ di spessore complessivo 1 mm.

Prove a trazione su Cycom 2020-36%-M55J-140-325: layup $[0/90/\pm 45]_{2s}$

In Figura 3.4 sono riportate le curve dei 5 campioni per un confronto diretto delle caratteristiche meccaniche.

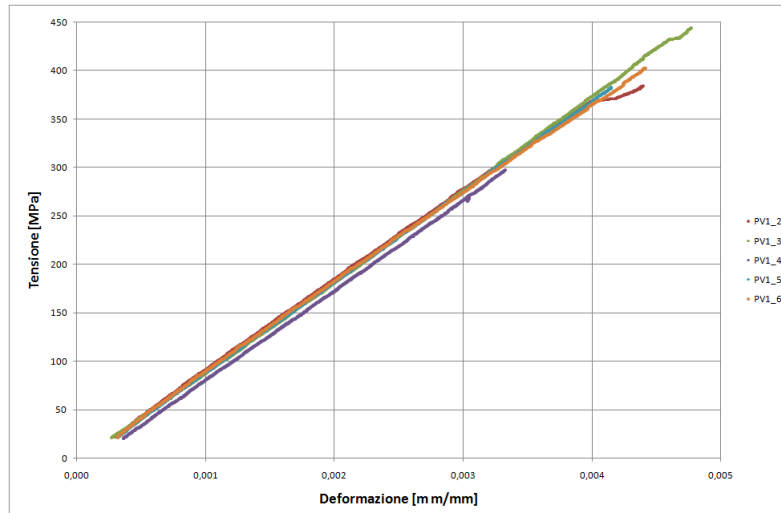


Figura 3.4: Tensione-deformazione Cycom 2020-36%-M55J-140-325

Nella Tabella 3.1 sono riportati i valori delle singole prove e i valori medi, le deviazioni standard e il coefficiente di variazione di tutte le grandezze misurate per le prove a trazione.

Tabella 3.1: Riassunto prove materiale Cycom 2020-36%-M55J-140-325

	F^{tu} [MPa]	E [GPa]	Poisson ν
PV1_2	384.4	93.10	0.38
PV1_3	445.1	93.66	
PV1_4	297.6	92.48	
PV1_5	383.0	92.70	0.33
PV1_6	402.6	92.13	0.36
Media	382.6	92.81	0.36
Dev.std.	53.69	0.59	0.02
Coefficiente di variazione	14.03	0.63	6.17

Prove a trazione su Cycom 2020-36%-M55J-140-325: layup $[0]_7$

In Figura 3.5 sono riportate le curve dei 7 campioni per un confronto diretto delle caratteristiche meccaniche.

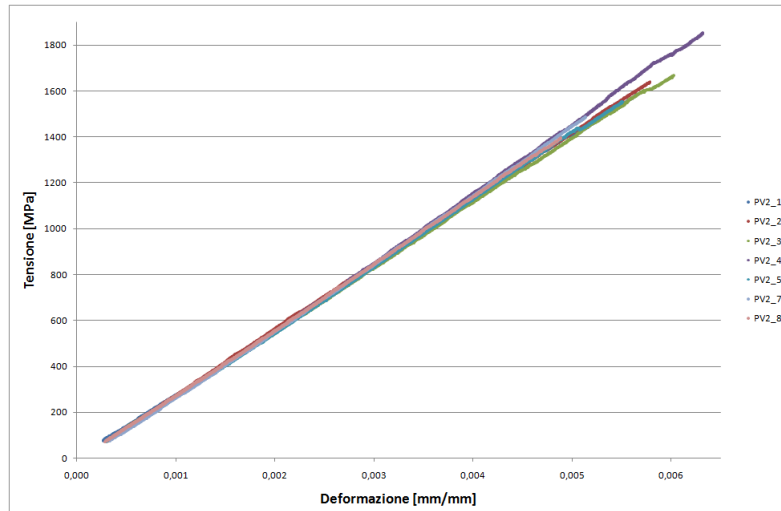


Figura 3.5: Tensione-deformazione Cycom 2020-36%-M55J-140-325

Nella Tabella 3.2 sono riportati i valori delle singole prove e i valori medi, le deviazioni standard e il coefficiente di variazione di tutte le grandezze misurate per le prove a trazione.

Tabella 3.2: Riassunto prove materiale Cycom 2020-36%-M55J-140-325

	F^{tu} [MPa]	E [GPa]	Poisson ν
PV2_1	1588.2	281.35	0.29
PV2_2	1638.6	285.91	0.29
PV2_3	1667.6	280.03	0.22
PV2_4	1852.8	289.50	0.28
PV2_5	1553.8	281.80	
PV2_7	1487.8	289.63	
PV2_8	1395.0	287.52	
Media	1660.2	283.72	0.27
Dev.std.	116.30	3.91	0.04
Coefficiente di variazione	7.01	1.38	13.03

Prove a trazione AS4/PPS layup $[0/90/\pm 45/0/90]_s$

In Figura 3.6 sono riportate le curve degli 8 campioni per un confronto diretto delle caratteristiche meccaniche.

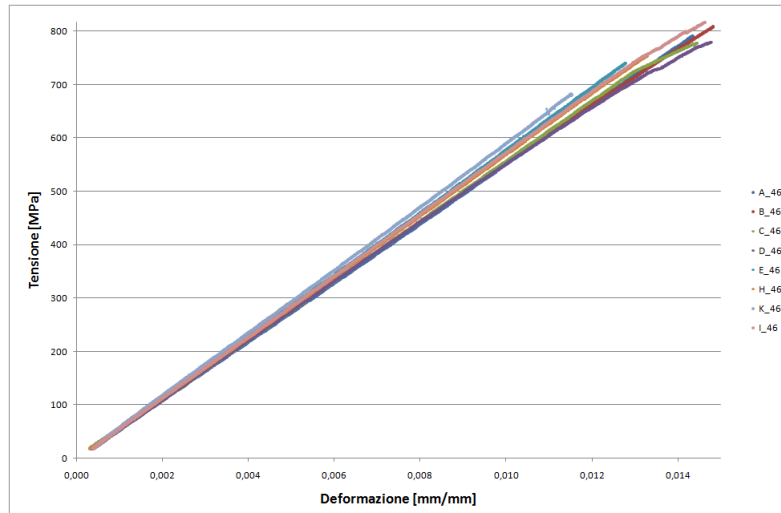


Figura 3.6: Tensione-deformazione AS4/PPS

Nella Tabella 3.3 sono riportati i valori delle singole prove e i valori medi, le deviazioni standard e il coefficiente di variazione di tutte delle grandezze misurate per le prove a trazione.

Tabella 3.3: Riassunto prove materiale AS4/PPS

	F^{tu} [MPa]	E [GPa]	Poisson ν
A_46	790.4	55.35	
B_46	808.3	55.33	0.1739
C_46	778.1	54.83	0.175
D_46	779.5	55.02	0.23
E_46	740.4	57.20	
H_46	754.5	56.58	
I_46	816.8	57.99	
K_46	682.9	59.40	
Media	781.14	56.04	0.19
Dev.std.	27.31	1.22	0.03
Coefficiente di variazione	3.50	2.17	15.85

Prove a trazione AS4/PPS layup $[0]_5$

In Figura 3.7 sono riportate le curve degli 8 campioni per un confronto diretto delle caratteristiche meccaniche.

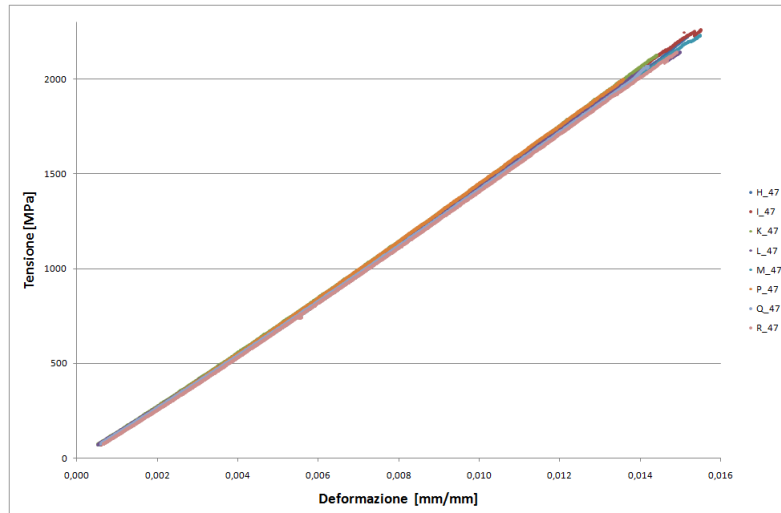


Figura 3.7: Tensione-deformazione AS4/PPS

Nella Tabella 3.4 sono riportati i valori delle singole prove e i valori medi, le deviazioni standard e il coefficiente di variazione di tutte le grandezze misurate per le prove a trazione.

Tabella 3.4: Riassunto prove materiale AS4/PPS

	F^{tu} [MPa]	E [GPa]	Poisson ν
H_47	2226.73	138.02	0.32
I_47	2259.29	137.70	
K_47	2124.90	138.95	
L_47	2141.95	137.09	0.30
M_47	2230.24	135.09	0.37
P_47	1997.16	139.12	
Q_47	2067.88	134.92	
R_47	2141.57	135.35	
Media	2148.72	137.03	0.33
Dev.std.	88.74	1.71	0.03
Coefficiente di variazione	4.13	1.25	10.25

3.3.3 Prove a compressione secondo ASTM Standard D6641/D6641M-01 (Combined Loading Compression CLC Test Fixture)

Per l'esecuzione delle prove sono state utilizzate mordacchie appositamente progettate e costruite^{3.8}. Le prove sono state eseguite in controllo di deformazione alla velocità di 0.01 mm/s. Tale attrezzatura è stata progettata in modo tale che il carico di compressione venga trasferito al provino in modo combinato, cioè con compressione e forza di taglio contemporaneamente, evitando il buckling.



Figura 3.8: Attrezzatura per prove a compressione

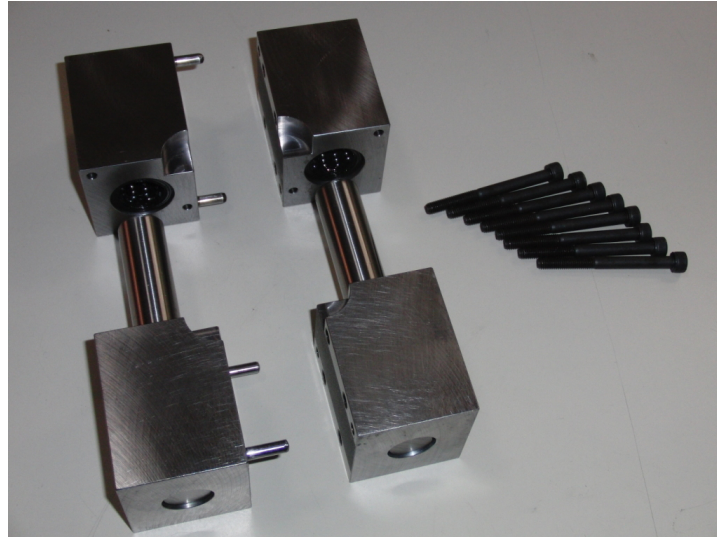


Figura 3.9: Attrezzatura per prove a compressione

La geometria del provino è illustrata in 3.10.

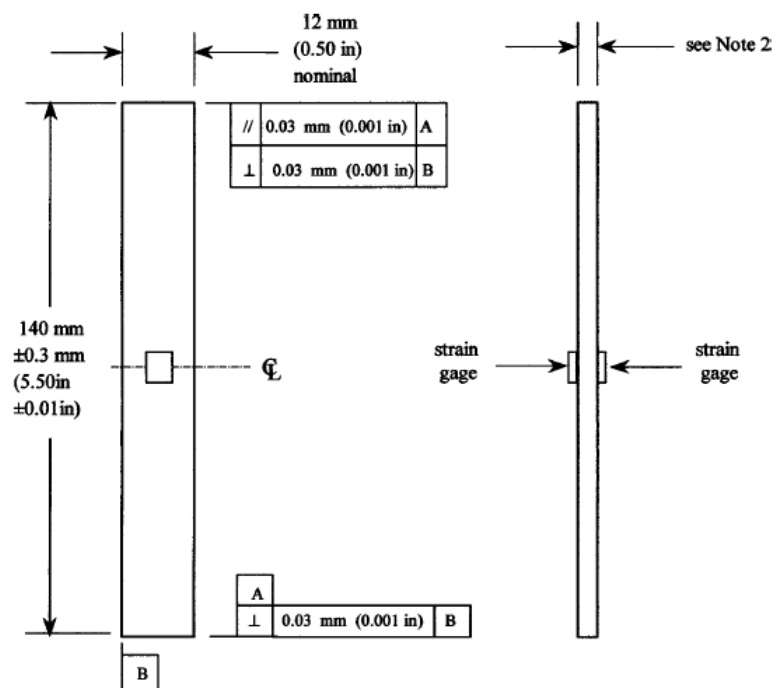


Figura 3.10: Provino a compressione

Su alcuni provini sono stati installati estensimetri su entrambe le facce in modo da valutare la percentuale di flessione B_y con l'obiettivo di validare la corretta esecuzione del test.

Si ricorda che:

$$B_y = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2} \cdot 100$$

e che un valore di $B_y \leq 10$ permette di considerare la prova affetta in modo trascurabile da flessione.

Si sono volute testare due diverse tipologie di layup per laminati termoidurenti:

1. Cycom 2020-36%-M55J-140-325, layup $[90/0/\pm 45]_{3s}$: Il materiale utilizzato per la realizzazione dei provini è un laminato unidirezionale costituito da matrice termoindurente, epoxy, e rinforzo in fibra lunga di carbonio HM disposto in 24 strati con layup $[90/0/\pm 45]_{3s}$ di spessore complessivo nominale 3,6 mm.
2. Cycom 2020-36%-M55J-140-325, layup $[0]_{22}$: Il materiale utilizzato per la realizzazione dei provini è un laminato unidirezionale costituito da matrice termoindurente, epoxy, e rinforzo in fibra lunga di carbonio HM disposto in 22 strati con lay-up $[0]_{22}$ di spessore complessivo nominale 3,3 mm.

Allo stesso modo sono state testate due tipologie di layup per laminati termoplastici:

1. AS4/PPS, layup $[0/90/\pm 45]_{2s}$: Il materiale utilizzato per la realizzazione dei provini è un laminato unidirezionale costituito da matrice termoplastica, PPS, e rinforzo in fibra lunga di carbonio AS4 disposto in 16 strati con lay-up $[0/90/\pm 45]_{2s}$ di spessore complessivo nominale 3,2 mm.
2. AS4/PPS, layup $[0]_{16}$: Il materiale utilizzato per la realizzazione dei provini è un laminato unidirezionale costituito da matrice termoplastica, PPS, e rinforzo in fibra lunga di carbonio AS4 disposto in 16 strati con lay-up $[0]_{16}$ di spessore complessivo nominale 3,2 mm.

Prove a compressione su Cycom 2020-36%-M55J-140-325: layup $[90/0/\pm 45]_{3s}$

In 3.11 sono riportate tutte le curve di compressione degli 8 campioni per un confronto diretto delle caratteristiche meccaniche.

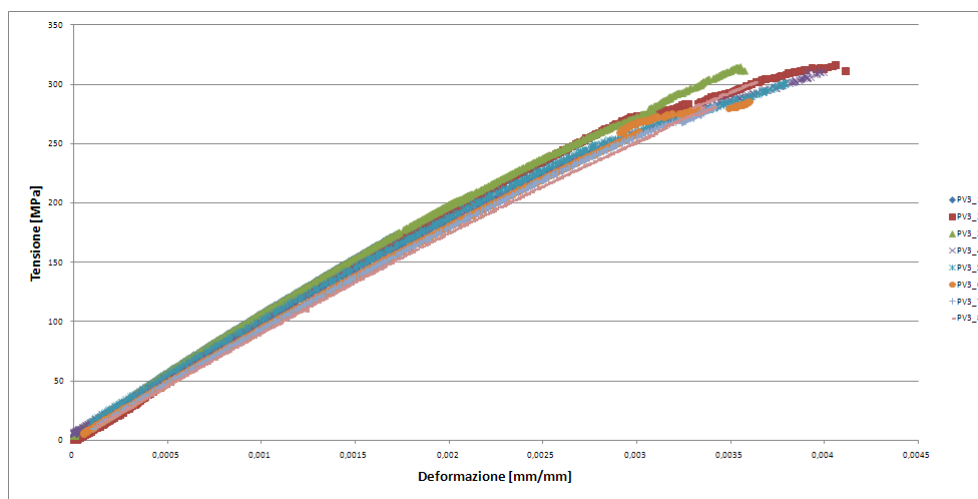


Figura 3.11: Curve di compressione provini HM Epoxy Cycom 2020 PV3

Nella tabella sono riportati i valori delle singole prove e i valori medi con le relative deviazioni standard di tutte le grandezze misurate per le prove di compressione su provini in Cycom 2020 PV3.

Tabella 3.5: Riassunto prove materiale Cycom 2020-36%-M55J-140-325

	F^{cu} [MPa]	E [GPa]	B_y
PV3_1	288	104	
PV3_2	316	100,5	5,15
PV3_3	314	107	2,48
PV3_4	310	90,4	1,51
PV3_5	300	86	
PV3_6	287	88,7	
PV3_7	281	93,7	
PV3_8	301	82	
Media	300	94	
Dev.std.	13,23	8,99	

Dai risultati delle prove si può concludere che i dati presentano una discreta ripetibilità e la bassa percentuale di inflessione mostra una corretta esecuzione del caricamento.

Prove a compressione su Cycom 2020-36%-M55J-140-325: layup [0]₂₂

In 3.12 sono riportate tutte le curve di compressione degli 8 campioni per un confronto diretto delle caratteristiche meccaniche.

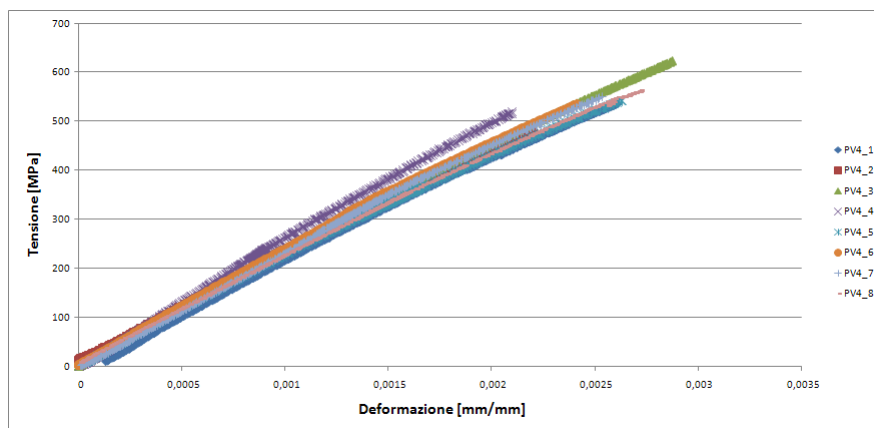


Figura 3.12: Curve di compressione provini HM Epoxy Cycom 2020 PV4

Nella tabella sono riportati i valori delle singole prove e i valori medi con le relative deviazioni standard di tutte le grandezze misurate per le prove di compressione su provini in Cycom 2020 PV3.

Tabella 3.6: Riassunto prove materiale Cycom 2020-36%-M55J-140-325

	F^{cu} [MPa]	E [GPa]	B_y
PV4_1	534	211,7	
PV4_2	483	218,5	
PV4_3	624	235,6	9,57
PV4_4	526	266,8	
PV4_5	542	213,6	1,24
PV4_6	543	236,9	
PV4_7	543	240,2	
PV4_8	550	215,689	2,08
Media	543	230	
Dev.std.	38,88	18,9	

Si ricorda che l'attrezzatura per prove a compressione CLC è utilizzabile per la misurazione del carico a rottura di provini realizzati con una percentuale massima di fibra a 0° del 50%. I valori ottenuti per F_{cunon} sono quindi affidabili in quanto fortemente sottostimati. L'attrezzatura garantisce invece buoni risultati per quanto riguarda la misurazione del modulo elastico, i dati presentano una discreta ripetibilità e la bassa percentuale di inflessione mostra una corretta esecuzione del caricamento.

Prove a compressione su AS4/PPS: layup $[0/90/\pm 45]_{2s}$

In 3.13 sono riportate tutte le curve di compressione degli 8 campioni per un confronto diretto delle caratteristiche meccaniche.

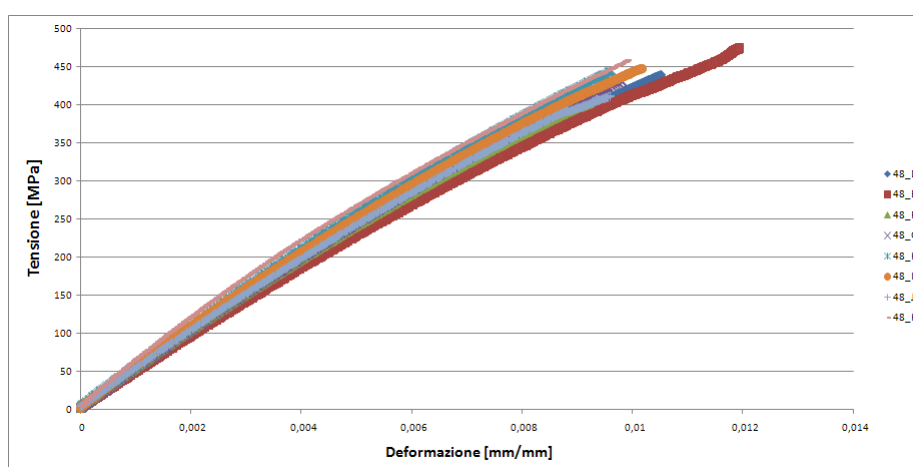


Figura 3.13: Curve di compressione provini AS4/PPS 48

Nella tabella sono riportati i valori delle singole prove e i valori medi con le relative deviazioni standard di tutte le grandezze misurate per le prove di compressione su provini in AS4/PPS 48.

Tabella 3.7: Riassunto prove materiale AS4/PPS 48

	F^{cu} [MPa]	E [GPa]	B_y
48_D	438	46,2	
48_E	474	47,1	5,15
48_F	403	48	2,48
48_G	430	51,2	1,51
48_H	438	52,1	
48_I	441	46,9	
48_J	410	48,3	
48_K	458	56,2	
Media	437	49,5	
Dev.std.	23,17	3	

Dai risultati delle prove si può concludere che i dati presentano una discreta ripetibilità e la bassa percentuale di inflessione mostra una corretta esecuzione del caricamento.

Prove a compressione su AS4/PPS: layup $[0]_{16}$

In 3.14 sono riportate tutte le curve di compressione degli 7 campioni per un confronto diretto delle caratteristiche meccaniche.

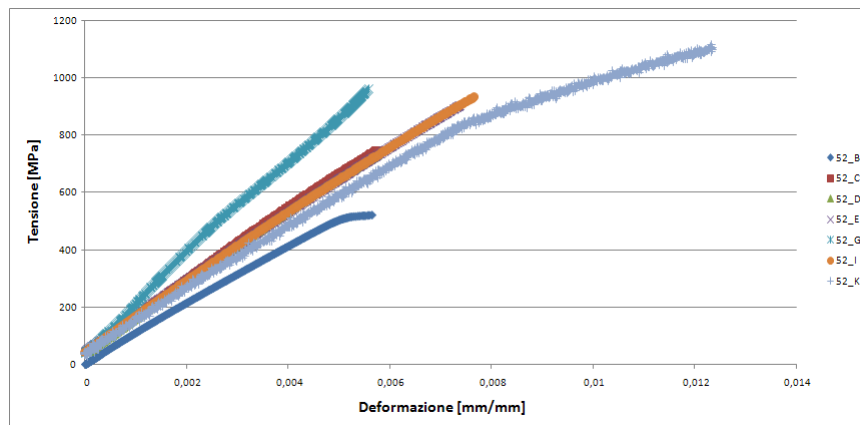


Figura 3.14: Curve di compressione provini AS4/PPS 52

Nella tabella sono riportati i valori delle singole prove e i valori medi con le relative deviazioni standard di tutte le grandezze misurate per le prove di compressione su provini in AS4/PPS 52.

Tabella 3.8: Riassunto prove materiale AS4/PPS 52

	F^{cu} [MPa]	E [GPa]	B_y	ν
52_B	-	102,5		0,401
52_C	-	124,3		0,414
52_D	-	121,5		
52_E	-	117,2	5,81	
52_G	-	170,6		
52_I	-	117,3	0,9	
52_K	1164	114,3	3,99	
Media	1164	123,9		0,408
Dev.std.	-	21,7		

L'attrezzatura CLC garantisce una corretta misurazione del carico a rottura solamente per laminati aventi una percentuale di lamine orientate a 0° inferiori al 50%. Il provino 52_K è stato testato utilizzando un'attrezzatura sperimentale per prove a compressione a fatica di materiali compositi progettata internamente al dipartimento DIEM, ed è l'unico provino che ha fornito un valore di carico a rottura a compressione plausibile. Dai risultati delle prove si può concludere che i dati riguardanti il modulo elastico presentano una discreta ripetibilità e la bassa percentuale di inflessione mostra una corretta esecuzione del caricamento.

3.3.4 Prove a taglio nel piano secondo ASTM D 5379

Le prove a taglio nel piano sono state eseguite con l'attrezzatura Iosipescu [20] progettata e realizzata precedentemente, scelta in base ad un'analisi sui diversi tipi di test utilizzati per la determinazione delle proprietà a taglio nel piano di materiali compositi. L'analisi aveva messo in luce le migliori qualità in termini di accuratezza, producibilità, costi di fabbricazione e costo dei test, di tale attrezzatura (3.15).

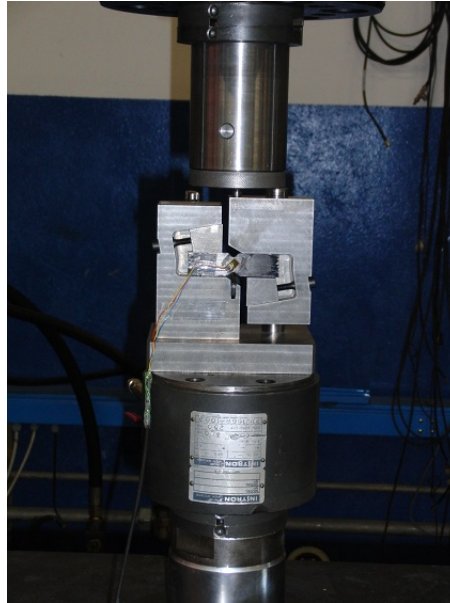


Figura 3.15: Attrezzatura per prove a taglio nel piano Iosipescu

Ulteriori fattori positivi che hanno portato alla scelta di tale tipologia di test sono:

1. Le dimensioni ridotte dei provini

La geometria del provino è illustrata in Fig.3.16.

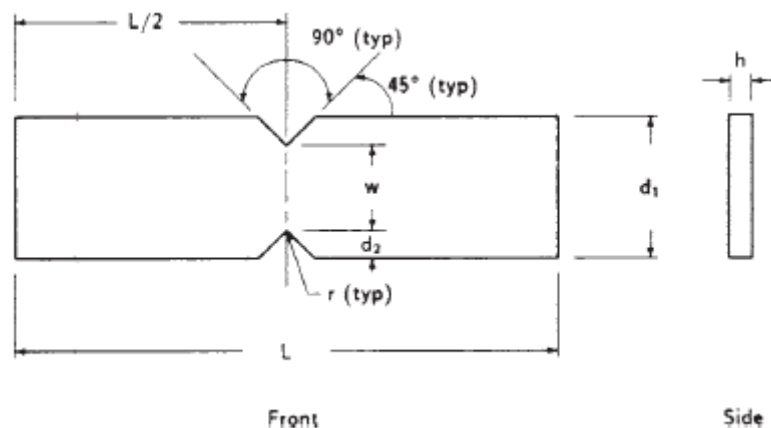


Figura 3.16: Provino per taglio

2. La possibilità di testare provini in unidirezionale, woven e in fibra discontinua

3. La possibilità di misurare le proprietà a taglio in tutte e tre le direzioni

4. La capacità di misurare la deformazione e la resistenza a taglio.

Il modulo di elasticità tangenziale G_{12} è stato calcolato nel campo di scorrimento di 0.004, cioè fra i $1500 \div 5500 \mu\epsilon$, mentre la resistenza a taglio nel piano F_u è stata calcolata considerando il più basso dei carichi ultimi.

Le due tipologie di layup per laminati termoindurenti testate sono le seguenti.

1. Cycom 2020-36%-M55J-140-325, layup $[0/90/\pm 45]_{3s}$: Il materiale utilizzato per la realizzazione dei provini è un laminato unidirezionale costituito da matrice termoindurente, resina epossidica Cycom 2020, e rinforzo in fibra lunga di carbonio disposto in 24 strati con lay-up $[0/90/\pm 45]_{3s}$ di spessore complessivo 3.6 mm.
2. Cycom 2020-36%-M55J-140-325, layup $[(0/90)_6]_s$: Il materiale utilizzato per la realizzazione dei provini è un laminato unidirezionale costituito da matrice termoindurente, resina epossidica Cycom 2020, e rinforzo in fibra lunga di carbonio disposto in 24 strati con lay-up $[(0/90)_6]_s$ di spessore complessivo 3.6 mm.

Le due tipologie di layup per laminati termoplastici testate sono le seguenti.

1. AS4/PPS, layup $[0/90/\pm 45]_{2s}$: Il materiale utilizzato per la realizzazione dei provini è un laminato unidirezionale costituito da matrice termoplastica, PPS, e rinforzo in fibra lunga di carbonio AS4 disposto in 16 strati con lay-up $[0/90/\pm 45]_{2s}$ di spessore complessivo 3.2 mm.
2. AS4/PPS, layup $[(0/90)_4]_s$: Il materiale utilizzato per la realizzazione dei provini è un laminato unidirezionale costituito da matrice termoplastica, PPS, e rinforzo in fibra lunga di carbonio AS4 disposto in 16 strati con lay-up $[(0/90)_4]_s$ di spessore complessivo 3.2 mm.

Prove a taglio nel piano su Cycom 2020-36%-M55J-140-325: layup $[0/90/\pm 45]_{3s}$

In Figura 3.17 sono riportate tutte le curve dei 6 campioni analizzati, per un confronto diretto delle caratteristiche meccaniche.

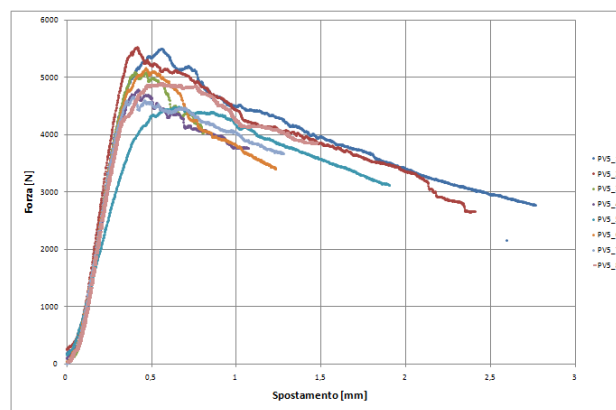


Figura 3.17: Forza-spostamento Cycom 2020-36%-M55J-140-325

Nella Tabella 3.10 sono riportati i valori delle singole prove e i valori medi, le deviazioni standard e il coefficiente di variazione di tutte le grandezze misurate per le prove a taglio.

Tabella 3.9: Riassunto prove materiale Cycom 2020-36%-M55J-140-325

	F^u [MPa]	G_{12} [MPa]
PV5_1	133.3	37525.6
PV5_2	134.3	38585.4
PV5_3	123.1	34689.8
PV5_4	115.4	33306.9
PV5_5	108.5	34414.7
PV5_6	125.5	40856.9
PV5_7	111.6	36473.3
PV5_8	117.3	42212.3
Media	119.74	36387.83
Dev.std.	9.67	2866.27
C.V.	8.07	7.9

Tabella 3.9: Riassunto prove materiale Cycom 2020-36%-M55J-140-325

Prove a taglio nel piano su Cycom 2020-36%-M55J-140-325: layup $[(0/90)_6]_s$

In Figura 3.18 sono riportate tutte le curve dei 6 campioni per un confronto diretto delle caratteristiche meccaniche.

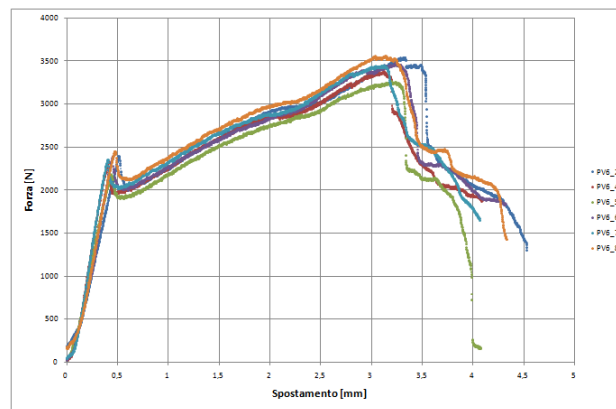


Figura 3.18: Forza-spostamento Cycom 2020-36%-M55J-140-325

Nella Tabella 3.10 sono riportati i valori delle singole prove e i valori medi, le deviazioni standard e il coefficiente di variazione di tutte le grandezze misurate per le prove a taglio.

Tabella 3.10: Riassunto prove materiale Cycom 2020-36%-M55J-140-325

	F^u [MPa]	G_{12} [MPa]
PV6_2	55.7	4354.5
PV6_4	53.9	4297.5
PV6_5	51.7	3911.3
PV6_6	56.4	4365.2
PV6_7	57.3	4424
PV6_8	58.5	4522.5
Media	55.6	4312.5
Dev.std.	2.5	210.84
C.V.	4.41	4.9

Tabella 3.10: Riassunto prove materiale Cycom 2020-36%-M55J-140-325

Prove a taglio AS4/PPS layup $[0/90/\pm 45]_{2s}$

In Figura 3.19 sono riportate tutte le curve degli 8 campioni per un confronto diretto delle caratteristiche meccaniche.

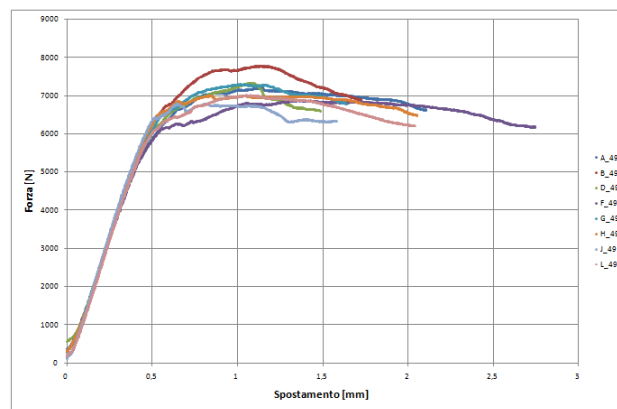


Figura 3.19: Forza-spostamento AS4/PPS

Nella Tabella 3.11 sono riportati i valori delle singole prove e i valori medi, le deviazioni standard e il coefficiente di variazione di tutte le grandezze misurate per le prove a taglio.

Tabella 3.11: Riassunto prove materiale AS4/PPS

	F^u [MPa]	G_{12} [MPa]
A_49	192,78	19118
B_49	205,45	18925
D_49	196,07	19022
F_49	185,58	19622,6
G_49	195,06	19412
H_49	185,16	18855
J_49	182,41	19121
L_49	190,23	19822,5
Media	191,6	19237,3
Dev.std.	7,5	346,3
C.V.	3,9	1,8

Tabella 3.11: Riassunto prove materiale AS4/PPS

Prove a taglio AS4/PPS layup $[(0/90)_4]_s$

In Figura 3.20 sono riportate tutte le curve degli 8 campioni per un confronto diretto delle caratteristiche meccaniche.

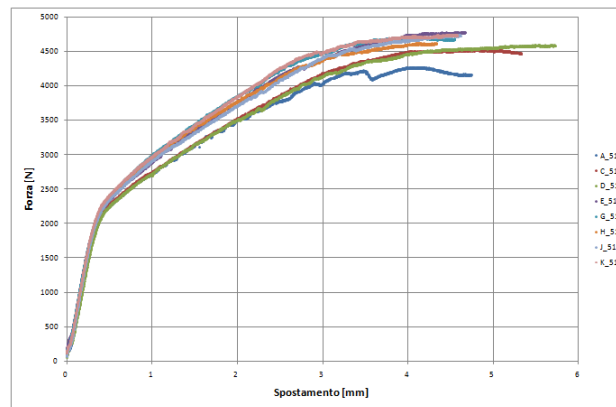


Figura 3.20: Forza-spostamento AS4/PPS

Nella Tabella 3.12 sono riportati i valori delle singole prove e i valori medi, le deviazioni standard e il coefficiente di variazione di tutte le grandezze misurate per le prove a taglio.

Tabella 3.12: Riassunto prove materiale AS4/PPS

	F^u [MPa]	G_{12} [MPa]
A_51	115.9	4537
C_51	118.5	4557
D_51	113	4439.4
E_51	115.8	4505.2
G_51	119	4240
H_51	117	4410.8
J_51	115.15	4490
K_51	117.3	4445.9
Media	116.5	4453
Dev.std.	1.93	99.32
C.V.	1.65	2.23

Tabella 3.12: Riassunto prove materiale AS4/PPS

3.3.5 Prove a taglio interlaminare secondo ASTM D 2344/D 2344M-00

Per l'esecuzione delle prove è stata utilizzata un'attrezzatura per flessione a tre punti.

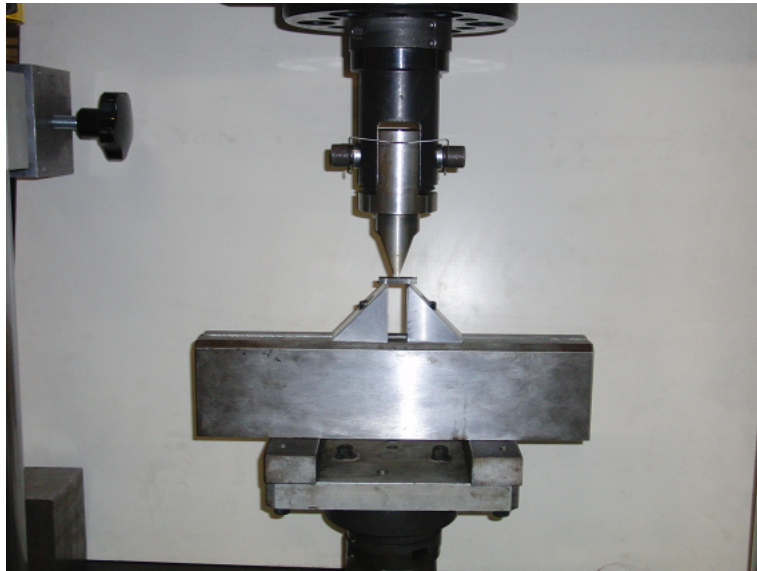


Figura 3.21: Attrezzatura per prova a taglio interlaminare

La geometria del provino è illustrata in Fig.3.22.

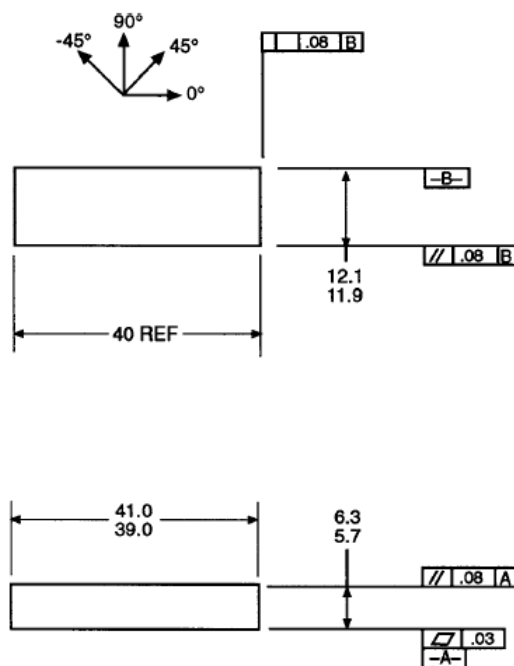


Figura 3.22: Provino per taglio interlaminare

Il carico massimo raggiunto durante la prova è rappresentato dalla sigla F^{SBS} .

Si sono volute testare due diverse tipologie di layup per laminati termoindurenti:

1. Cycom 2020-36%-M55J-140-325, layup $[0/90/\pm 45]_{5s}$: Il materiale utilizzato per la realizzazione dei provini è un laminato unidirezionale costituito da matrice termoindurente, resina epossidica Cycom 2020, rinforzo in fibra lunga di carbonio disposto in 40 strati con lay-up $[0/90/\pm 45]_{5s}$ di spessore complessivo 6.0 mm.
2. Cycom 2020-36%-M55J-140-325, layup $[0]_{40}$: Il materiale utilizzato per la realizzazione dei provini è un laminato unidirezionale costituito da matrice termoindurente, resina epossidica Cycom 2020, rinforzo in fibra lunga di carbonio disposto in 40 strati con lay-up $[0]_{40}$ di spessore complessivo 6.0 mm.

Allo stesso modo sono state testate due tipologie di layup per laminati termoplastici:

1. AS4/PPS, layup $[0/90/\pm 45]_{4s}$: Il materiale utilizzato per la realizzazione dei provini è un laminato unidirezionale costituito da matrice termoplastica, PPS, e rinforzo in fibra lunga di carbonio AS4 disposto in 32 strati con lay-up $[0/90/\pm 45]_{4s}$ di spessore complessivo 6.4 mm.
2. AS4/PPS, layup $[0]_{32}$: Il materiale utilizzato per la realizzazione dei provini è un laminato unidirezionale costituito da matrice termoplastica, PPS, e rinforzo in fibra lunga di carbonio AS4 disposto in 32 strati con lay-up $[0]_{32}$ di spessore complessivo 6.4 mm.

RIASSUNTO CARATTERISTICHE A TAGLIO INTERLAMINARE CYCOM 2020-36%-M55J-140-325 PV7

In Figura 3.23 sono riportate tutte le curve degli 8 campioni per un confronto diretto delle caratteristiche meccaniche.

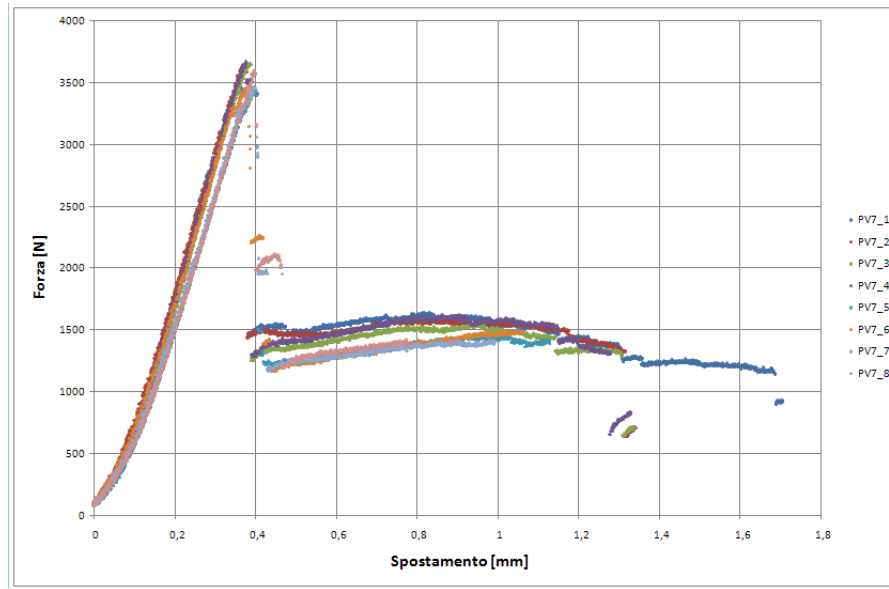


Figura 3.23: Forza-spostamento CYCOM 2020-36%-M55J-140-325 PV7

Nella Tabella sono riportati i valori delle singole prove e i valori medi, le deviazioni standard e il coefficiente di variazione di tutte le grandezze misurate per le prove a taglio interlaminare.

Tabella 3.13: Riassunto prove materiale CYCOM 2020-36%-M55J-140-325 PV7

	F^{SBS} [MPa]
PV7_1	37.74
PV7_2	39.21
PV7_3	39.02
PV7_4	39.61
PV7_5	36.93
PV7_6	37.58
PV7_7	37.23
PV7_8	38.72
Media	38.26
Dev.std.	1.00
C.V.	2.63

	F^{SBS} [MPa]
--	-----------------

 Tabella 3.13: Riassunto prove materiale CYCOM 2020-36%-M55J-140-325 PV7

RIASSUNTO CARATTERISTICHE A TAGLIO INTERLAMINARE CYCOM 2020-36%-M55J-140-325 PV8

In Figura 3.24 sono riportate tutte le curve degli 8 campioni per un confronto diretto delle caratteristiche meccaniche.

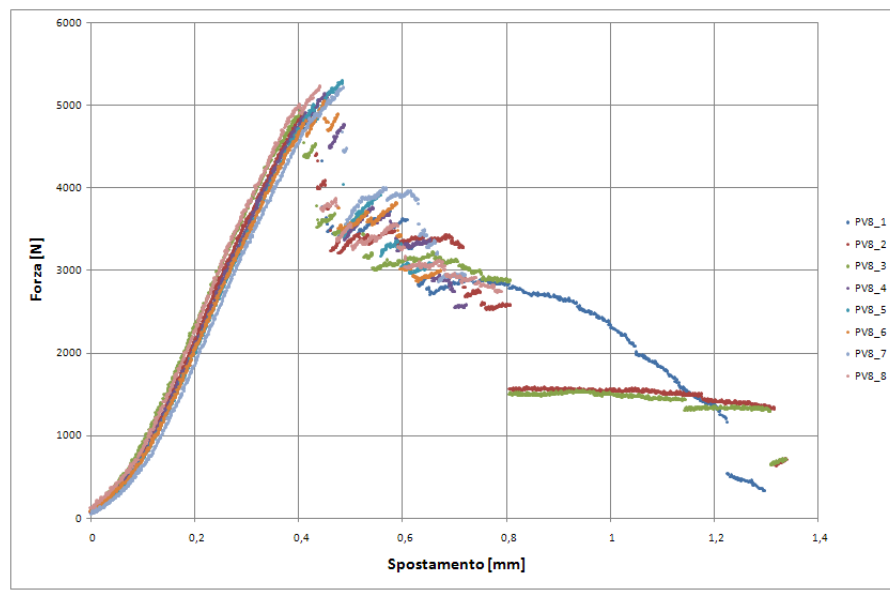


Figura 3.24: Forza-spostamento Cycom 2020-36%-M55J-140-325 PV8

Nella Tabella sono riportati i valori delle singole prove e i valori medi, le deviazioni standard e il coefficiente di variazione di tutte le grandezze misurate per le prove a taglio interlaminare.

Tabella 3.14: Riassunto prove materiale Cycom 2020-36%-M55J-140-325 PV8

	F^{SBS} [MPa]
PV8_1	52.67
PV8_2	51.37
PV8_3	52.32

	F^{SBS} [MPa]
PV8_4	54.72
PV8_5	56.10
PV8_6	53.62
PV8_7	55.52
PV8_8	54.41
Media	53.84
Dev.std.	1.64
C.V.	3.05

Tabella 3.14: Riassunto prove materiale Cycom 2020-36%-M55J-140-325 PV8

RIASSUNTO CARATTERISTICHE A TAGLIO AS4/PPS 50

In Figura 3.25 sono riportate tutte le curve degli 8 campioni per un confronto diretto delle caratteristiche meccaniche.

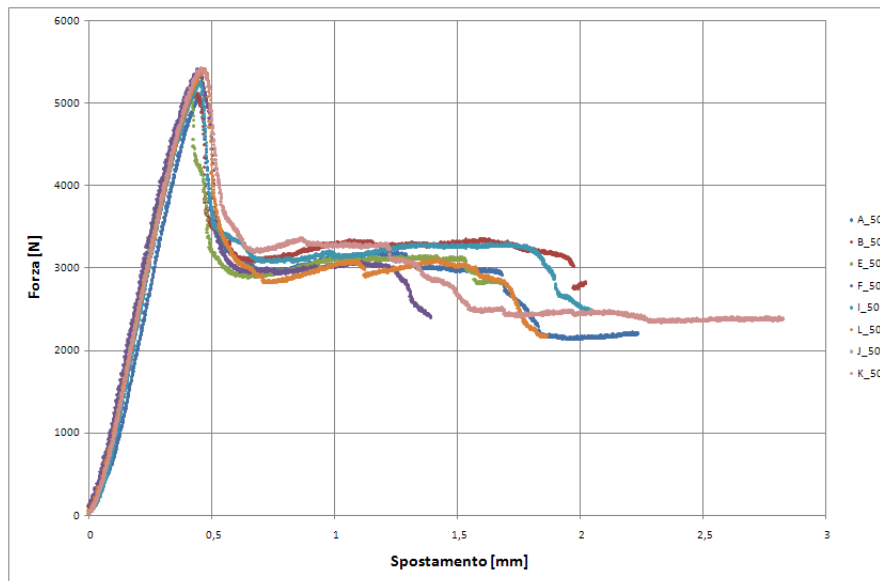


Figura 3.25: Forza-spostamento AS4/PPS 50

Nella tabella sono riportati i valori delle singole prove e i valori medi, le deviazioni standard e il coefficiente di variazione di tutte le grandezze misurate per le prove a taglio interlaminare.

Tabella 3.15: Riassunto prove materiale AS4/PPS 50

	F^{SBS} [MPa]
A_50	47.08
B_50	48.01
E_50	47.43
F_50	50.61
I_50	48.60
K-50	50
L-50	50.30
Media	48.85
Dev.std.	1.44
C.V.	2.94

Tabella 3.15: Riassunto prove materiale AS4/PPS 50

RIASSUNTO CARATTERISTICHE A TAGLIO INTERLAMINARE AS4/PPS 53

In Figura 3.26 sono riportate tutte le curve degli 8 campioni per un confronto diretto delle caratteristiche meccaniche.

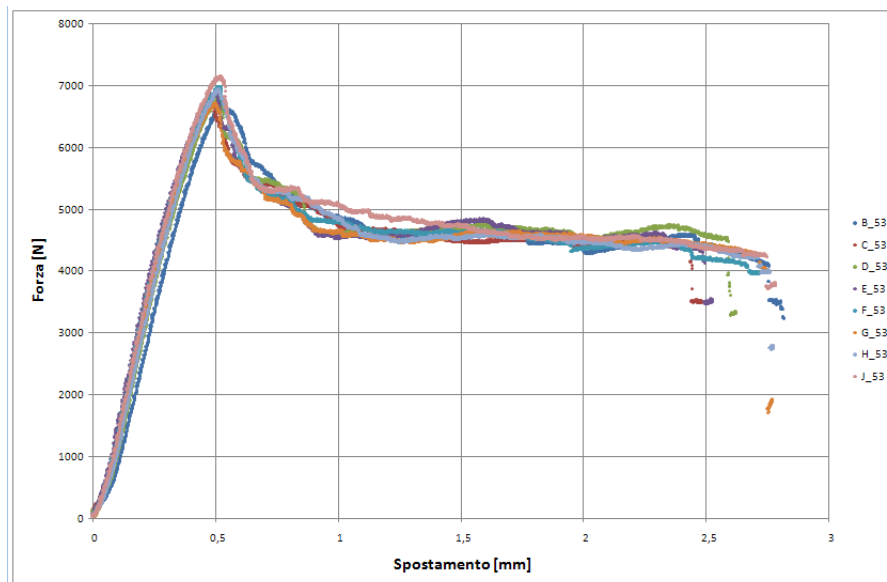


Figura 3.26: Forza-spostamento AS4/PPS 53

Nella tabella sono riportati i valori delle singole prove e i valori medi, le deviazioni standard e il coefficiente di variazione di tutte le grandezze misurate per le prove a taglio interlaminare.

Tabella 3.16: Riassunto prove materiale AS4/PPS 53

	F^{SBS} [MPa]
B_53	61.10
C_53	63.10
D_53	64.20
E_53	63.77
F_53	65.48
G_53	62.87
H_53	64.90
J_53	66.29
Media	63.96
Dev.std.	1.64
C.V.	2.56

Tabella 3.16: Riassunto prove materiale AS4/PPS 53

3.3.6 Database

Dalla campagna di prove effettuate, si sono ricavate le proprietà meccaniche del laminato. Tali proprietà verranno poi utilizzate durante la fase progettuale e di calcolo strutturale.

Capitolo 4

Studio del comportamento flessione torsionale di un telaio nastrato in composito

4.1 Sviluppo di una tecnologia di produzione automatizzata

Lo studio svolto in merito alle tecniche di produzione di componenti strutturali in materiale composito ha permesso il raggiungimento di una precisa consapevolezza dello stato dell'arte del settore, in particolare in riferimento ai processi attualmente utilizzati per l'industrializzazione in media-grande serie.

Gli obiettivi funzionali e di processo necessari per garantire il successo di una tecnologia adatta alla produzione in medio grande serie di componenti strutturali in materiale composito sono:

1. Elevate prestazioni meccaniche del pezzo finito
2. Elevata produttività adatta alla media serie
3. Elevata ripetibilità ed affidabilità
4. Bassi costi di produzione

Si analizzano in breve i processi in grado di garantire il raggiungimento dei suddetti obiettivi:

Materiali con resina termoindurente:

- Laminazione automatica di pre-preg termoindurenti (tape laying o fiber placing) e polimerizzazione OoA (out of autoclave) in:
 - Pressa calda
 - Sacco a vuoto o termo restringente + Forno

I vantaggi di tale tecnologia sono: elevata produttività, bassi costi di laminazione, elevata ripetibilità e buone caratteristiche meccaniche.

Un limite importante della laminazione in tape laying è la possibilità di produrre solamente dei pannelli e non forme complesse.

La laminazione in fiber placing invece permette la laminazione di forme complesse, ma è necessario che il pezzo abbia natura quasi di rivoluzione.

- Injection Moulding (RTM) + ove possibile Braiding 3D
 - Elevata produttività
 - Medi costi di processo
 - Elevata ripetibilità
 - Caratteristiche meccaniche medie, a causa della bassa percentuale di fibre ottenibile nel materiale e fragilità della resina di injection moulding.
- Filament Winding
 - Produzione solamente di pezzi assialsimmetrici.
 - Elevata ripetibilità e caratteristiche meccaniche.
- Pultrusione e Pullwinding
 - Produzione solamente di pezzi di forma pari all'estruso metallico
 - Elevata ripetibilità, caratteristiche meccaniche, produttività, bassi costi.

Materiali con resina termoplastica:

- Laminazione automatica di pre-preg termoplastici (tape laying o fiber placing) e termoformatura:
 - Stessi svantaggi della laminazione automatica di materiali termoindurenti.
 - Vantaggio di non necessità di polimerizzazione in forno.
- Termoformatura di pannelli pre-laminati
 - Forte limitazione nelle forme realizzabili.

Con l'obiettivo di sintetizzare i principali vantaggi delle tecnologie suddette e permettere la realizzazione di forme più complesse si è proceduto all'analisi di fattibilità, attraverso uno studio funzionale e una prima progettazione di una tecnologia di produzione per nastratura automatizzata di componenti strutturali in materiale composito. Attraverso tale tecnologia ci si è posti anche l'obiettivo di fornire una soluzione innovativa al problema della giuntabilità di componenti in materiale composito che è generalmente affrontata dai metodi di progettazione convenzionali in maniera inadeguata alla

natura fibrosa a trazione dei materiali compositi. Giunzioni quali incollaggi, rivettature, annegamenti di inserti co-polimerizzati e/o incollati con pochi vincoli di forma e lavoranti fondamentalmente a taglio, rappresentano l'anello debole nella trasmissione delle linee di forza in una struttura in materiale composito.

4.2 Progettazione del telaio nastrato mediante nastratura automatizzata su inserti di lega leggera e cores

A seguito di prime valutazioni geometriche e funzionali sulle strutture da realizzare in merito al processo, si è proceduto alla prima progettazione della tecnologia secondo i seguenti obiettivi funzionali:

- Possibilità di nastrare in continuo la struttura
- Trasmissione dei carichi attraverso inserti metallici nastrati
- Utilizzo di nastri preimpregnati adatti all'utilizzo Out of autoclave
- Realizzazione di componenti ad anello chiuso la cui giunzione possa realizzare strutture complessive in cui la trasmissione dei carichi avvenga tra nastrature e inserti su grandi estensioni di superficie e facendo lavorare le nastrature anche a trazione, e non solo a taglio.

Si è pensato, quindi, di disegnare un telaio di vettura sportiva ad alte prestazioni, realizzato con l'impiego di leghe leggere con innovativi processi di giunzione e materiali compositi a basso costo.

In primo luogo si è analizzato il giunto funzionante secondo il principio delle legature strutturali. Le problematiche riscontrate in tale giunzione riguardano l'elevata complessità nel creare dei vincoli di forma, che implicano l'utilizzo di uno stampo e la relativa compattazione in autoclave.

In Figura 4.1 è riportata la sequenza delle fasi di nastratura di un componente: i trasferimenti di carico tra i vari componenti, che solitamente sono caratterizzati nelle zone di accoppiamento da tensionamenti fortemente triassiali, vengono gestiti dagli inserti in materiale metallico, mentre il trasferimento di carico tra i vari punti di accoppiamento viene gestito dalla nastratura strutturale che sostiene tensionamenti caratterizzati da una direzionalità preferenziale. Lontano dalle zone di accoppiamento la nastratura viene sostenuta al momento della deposizione da cores in schiuma o honeycomb. Si nota che se termoindurente, la nastratura viene sottoposta a cottura in forno senza bisogno di autoclave (qualità Filament Winding), mentre se termoplastica deve essere depositata in temperatura.

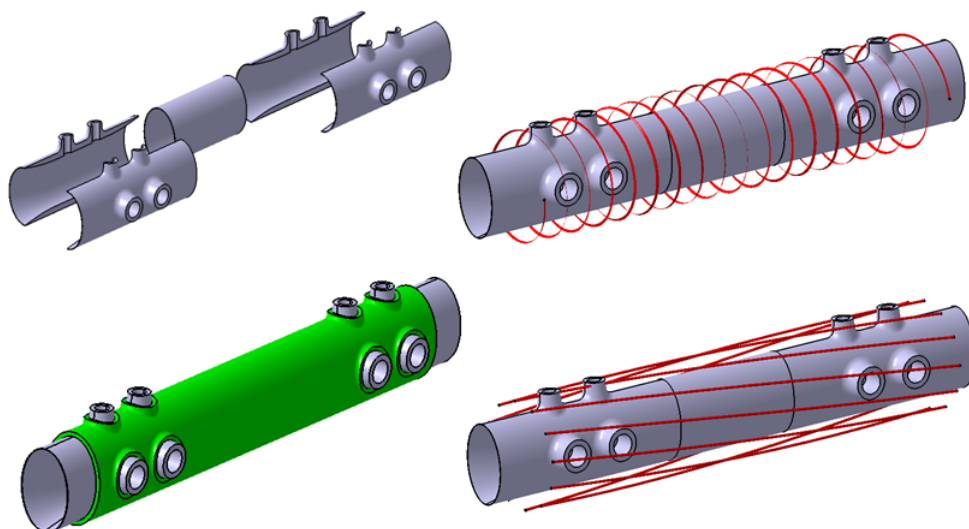


Figura 4.1: Giunzione telaio innovativo

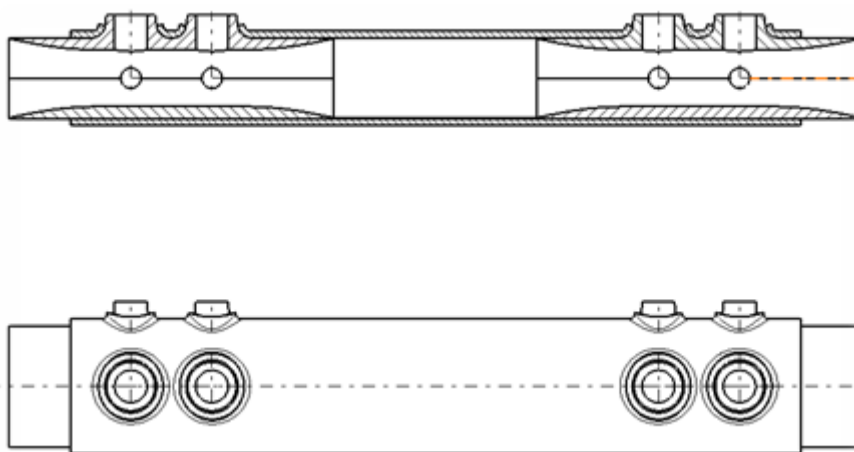


Figura 4.2: Sezione del componente nastrato

Alla fine di questo studio preliminare si è giunti alla conclusione che per rendere tale tecnologia industrializzabile, è necessario l'utilizzo di macchine nastratrici toroidali costruite appositamente per tale scopo.

Si è pensato quindi che la strada era sì la legatura strutturale, ma del tipo nastratura automatizzata. Tale idea è nata dallo studio dei telai in carbonio delle biciclette e delle moto, da cui si è intuito che per giuntare le parti è necessario utilizzare degli inserti metallici, i quali siano facilmente legabili e permettano un accoppiamento tra le parti. Si è posta quindi l'attenzione sullo studio e lo sviluppo di una tecnologia produttiva di nastratura strutturale automatizzata di fibre preimpregnate in resina termoindurente o nastri termoplastici, in direzioni preferenziali per la buona legatura degli inserti di alluminio e cores ed il trasferimento dei carichi tra gli stessi.

La tecnologia che si vuole utilizzare per la realizzazione del telaio, è la nastratura automatizzata di fibre preimpregnate in resina termoindurente o a matrice termoplastica, che permette un posizion-

amento del nastro nelle direzioni preferenziali per la buona legatura degli inserti ed il trasferimento dei carichi tra gli stessi.

Si definisce il processo, descrivendone le diverse fasi:

1. Realizzazione per fusione a cera persa degli inserti in alluminio
2. Lavorazioni meccaniche sugli inserti (piani di accoppiamento, forature ed eventuali filettature)

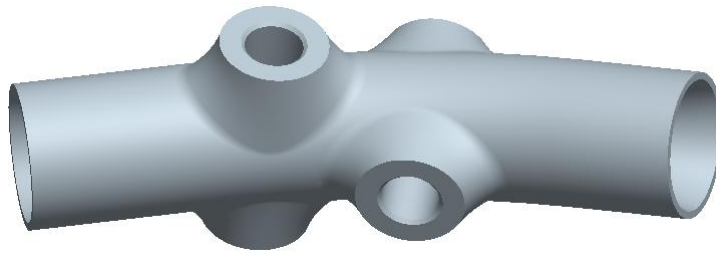


Figura 4.3: Inserto

(a)

3. Assemblaggio perni di sostegno e tappi conici di aiuto alla deposizione del nastro in corrispondenza degli attacchi

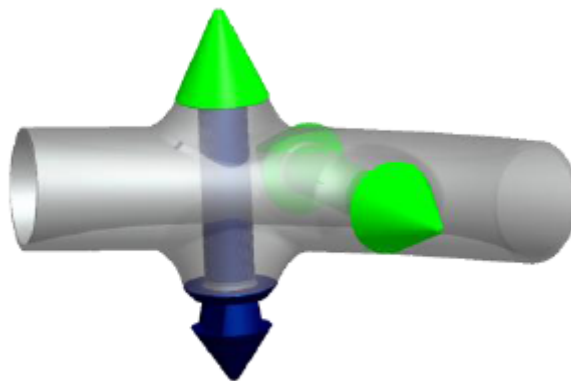


Figura 4.4: Assemblaggio

(a)

4. Posizionamento degli inserti all'interno dello stampo di colata del materiale di supporto alla nastratura
5. Colata del materiale di supporto alla nastratura
6. Posizionamento dell'assieme "mandrino" nella stazione di nastratura automatizzata

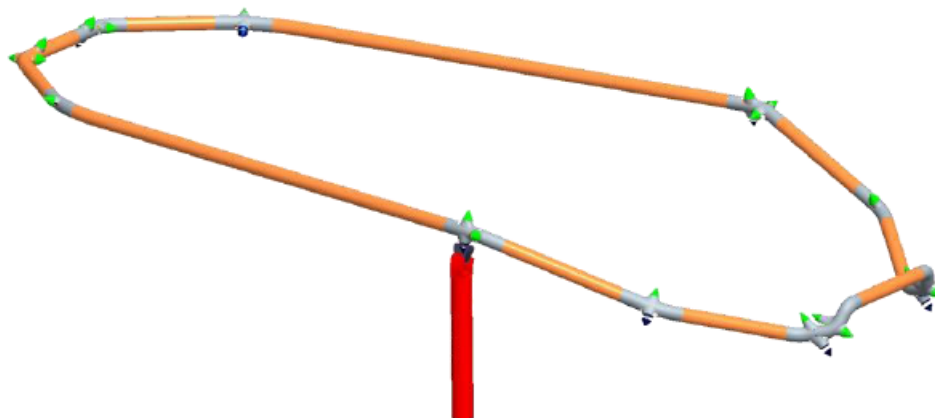


Figura 4.5: Posizionamento dell'assieme

- (a)
- (b) Ogni perno di sostegno è bloccato da un afferraggio mobile che si disimpegna e permetta il passaggio della testa di nastratura ad ogni giro.
7. Nastratura di nastri di preimpregnato Out of autoclave:

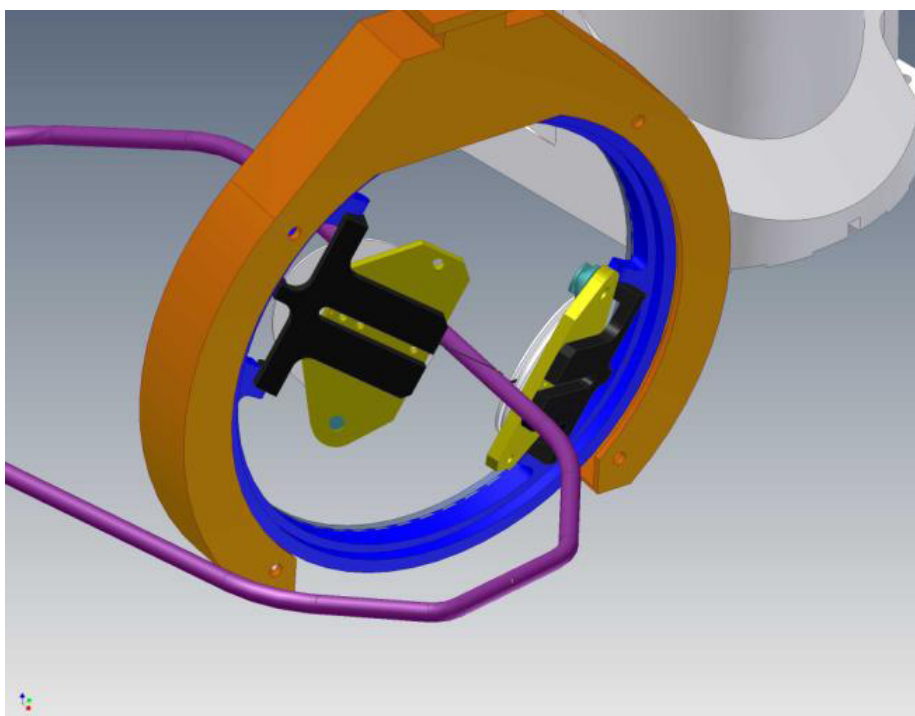


Figura 4.6: Braccio antropomorfo per nastratura automatizzata

(a)

- (b) Prima progettazione di una testa di nastratura attrezzabile su bracci antropomorfi commerciali che permetta la completa nastratura di un componente senza cambio di bobina di preimpregnato.
- 8. Cambio bobina e nastratura con strato di termorestringente per la realizzazione del debulking del laminato nastrato ottenuto
- 9. Polimerizzazione in forno (out of autoclave)
- 10. Eventuale estrazione materiale di supporto della nastratura per solubilizzazione

Il vantaggio di utilizzare dei nastri preimpregnati a matrice termoindurente, sta nel poter eseguire il curing direttamente in forno senza il passaggio in autoclave, riducendo così i costi e i tempi di produzione, eliminando inoltre la progettazione e la costruzione dei relativi stampi utilizzati per la compattazione.

4.2.1 Disegno di un telaio di vettura Formula Student in materiale composito realizzato mediante nastratura automatizzata

Si vuole dimostrare la flessibilità e consistenza del processo disegnando un telaio intercambiabile al telaio FSAE 2009 in tubolare d'acciaio (stessi punti di attacco motore, punti di attacco telaio posteriore, attacchi sospensioni anteriori) e che garantisca un sostanziale vantaggio in termini di peso a pari rigidità torsionale.



Figura 4.7: Telaio FSAE 2009

Si è proceduto al disegno e al primo dimensionamento degli inserti e della nastratura dei diversi anelli in accordo con i limiti geometrici imposti dal processo e secondo l'obiettivo di ottenere la pari

rigidezza del singolo tubo tra acciaio e carbonio, ipotizzando di ottenere sulla struttura finita una rigidezza torsionale simile all'esistente in acciaio e una sostanziale riduzione di peso motivata dalla densità sensibilmente minore dei materiali.

Si è ipotizzato di utilizzare il materiale UD Cycom 2020 che è stato completamente caratterizzato.

Durante la progettazione del telaio in materiale composito si è valutato di realizzare angolazioni di nastratura pari a 60° rispetto alla traiettoria di ogni singolo anello in corrispondenza della zona di attacchi e di 30° nella zona tubolare. Si è quindi effettuato un primo dimensionamento della nastratura laminata avente modulo elastico nella direzione longitudinale alla traiettoria dell'anello pari a 189 GPa (ottenuto mediante la teoria classica dei laminati) per raggiungere pari rigidezza del tubo d'acciaio attuale.

In figura 4.8 si riporta il layout del telaio nastrato mediante il processo precedentemente descritto.

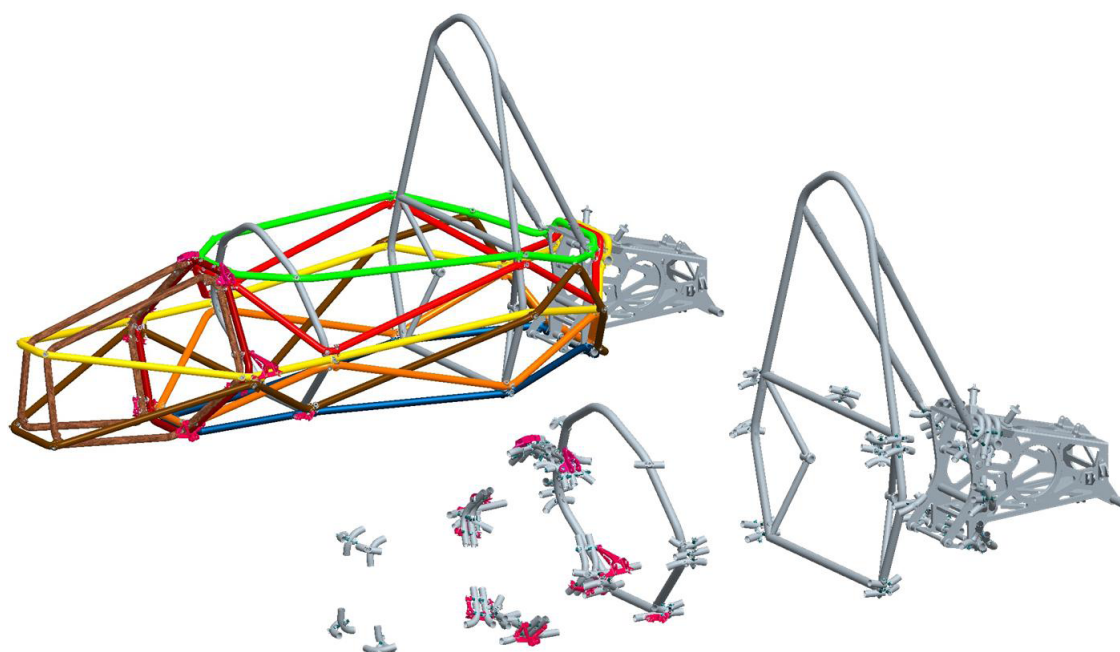


Figura 4.8: Telaio nastrato

Si è, quindi, realizzato un calcolo agli elementi finiti in ambiente Ansys Workbench, per la valutazione della rigidezza torsionale dei due telai in tubolare d'acciaio e nastrato.

4.2.2 La rigidezza torsionale di un telaio

Il parametro fondamentale per la progettazione di uno chassis è certamente la rigidezza torsionale, ovvero la sua capacità di sopportare carichi torsionali. Questa infatti influenza il funzionamento delle sospensioni dato che determina lo spostamento dei loro punti d'attacco al telaio e quindi, modificando il loro comportamento dinamico, influenza quello di tutto il veicolo [66].

Per chiarire l'importanza di questo parametro, possiamo fare riferimento alle due tipologie di competizioni che si pongono agli estremi delle gare automobilistiche: la Formula 1 e le gare di Kart. Nelle auto di Formula 1 si ricerca la massima rigidezza torsionale del telaio per garantire una posizione

quasi fissa, dei punti d'attacco delle sospensioni, l'ordine di grandezza è di oltre 20000 Nm/deg. Nei Kart invece non sono presenti delle sospensioni vere e proprie, e l'azione sospensiva viene svolta proprio dal telaio, che con la sua deformabilità programmata svolge la funzione sospensiva garantendo il contatto ruote-pista.

Un veicolo per la Formula Student, essendo una monoposto dotata di sospensioni, è sicuramente più simile ad una Formula 1 piuttosto che ad un Kart, perciò lo chassis non deve essere troppo flessibile. In generale non è semplice realizzare un telaio rigido, in quanto molto spesso la rigidità è proporzionale alla massa che, dovrebbe essere il più bassa possibile in quanto essa influenza negativamente il comportamento dinamico del veicolo in tutte le prove previste dal regolamento SAE. Rimane da chiarire quando si possa definire rigido un telaio; un valore valido universalmente non può esistere, perché dipende dall'utilizzo a cui è destinato il veicolo (slalom, rally, velocità su strada, velocità in pista etc.). Certamente possiamo affermare che per la monoposto considerata, la rigidità torsionale sarà almeno di un ordine di grandezza inferiore a quella di una Formula 1.

Se si considera il comportamento dinamico di un veicolo ed in particolare la marcia in curva, si può definirlo bilanciato se si ottiene lo stesso livello di aderenza dagli assi anteriore e posteriore, ossia se da entrambi gli assi si ottiene una forza tale da dare la stessa accelerazione laterale. La tenuta laterale è strettamente dipendente dal funzionamento delle sospensioni, che come già detto sono influenzate dal comportamento del telaio. Si può così dire che la rigidità torsionale dello chassis deve essere un multiplo della rigidità totale a rollo delle sospensioni. Ovviamente la rigidità torsionale non è il solo parametro attraverso cui esprimere la rigidità di un telaio. Anche la rigidità flessionale può essere utilizzata per descrivere l'efficienza di una particolare geometria di telaio ma, la rigidità flessionale non è così importante come la rigidità torsionale in quanto, la deformazione dovuta alla flessione non andrà ad influenzare i carichi sugli pneumatici.

4.2.3 Trattazione matematica e grafica degli output

Si è scelto un procedimento matematico per il calcolo della rigidità torsionale, che abbia validità generale. Ovvero è da considerarsi concettualmente identico per ogni telaio, per tipologia di prova effettuata e set-up scelto.

Si parte dal risultato ottenuto dalle analisi, in particolare considerando lo spostamento verticale rispetto alla posizione iniziale dei due nodi caricati.

Si procede, quindi, sotto le ipotesi di elasticità lineare, di piccoli spostamenti e di piccole deformazioni, come illustrato di seguito:

- Acquisizione del δ_a e δ_b calcolati in ambiente Ansys Workbench (si considerino A e B i nodi caricati della prova in questione).
- Calcolo dell'angolo di rotazione α in gradi; vigenti le ipotesi di piccoli spostamenti e piccole deformazioni, si è potuto confondere l'angolo con la sua tangente:

$$\alpha = \left[\frac{|\delta_a| + |\delta_b|}{d} \right] \cdot \left(\frac{180}{\pi} \right)$$

dove:

α è l'angolo di rotazione espresso in gradi

δ_a e δ_b sono gli spostamenti dei due nodi caricati

d è la distanza fra i due nodi

in cui il significato dei termini è chiarito dalla schematizzazione sottostante:

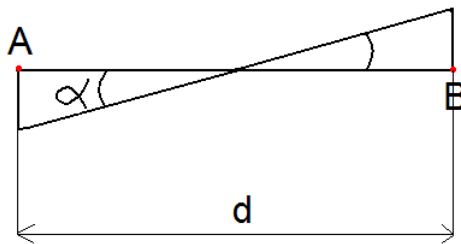


Figura 4.9: Angolo di rotazione

La coppia torcente applicata lungo la linea dell'asse anteriore è nota, M_t :

$$M_t = F \cdot d \text{ [Nm]}$$

Si calcola la rigidezza torsionale del telaio in Nm, con la relazione “causa-effetto”, essendo in ipotesi di elasticità lineare:

$$M_t = K_t \cdot \alpha \Rightarrow K_t = \frac{M_t}{\alpha} \text{ [Nm/}^\circ\text{]}$$

4.2.4 Calcolo della rigidezza torsionale telaio Formula SAE nastrato

La simulazione per il calcolo della rigidezza torsionale è stata realizzata in ambiente Ansys Workbench.

In prima analisi si è discretizzato il telaio: sono stati scelti elementi diversi a seconda della geometria per seguirne meglio la forma. Le giunzioni delle nastrature sono state meshate con elementi tetra del secondo ordine, cioè aventi 10 nodi, mentre i tubolari sono stati modellati con elementi Hexa a 20 nodi.

Per eseguire questo tipo di modellazione, è stata necessaria una preparazione del modello in ambiente CAD, ed in particolare grazie all'ausilio di Catia V5, si è suddiviso il modello in più parti, cercando di ricondurlo ad un insieme di parti elementari. Tale suddivisione è servita per la necessità di meshare le parti tubolari con un algoritmo di tipo Sweep, in modo da ottenere una discretizzazione migliore.

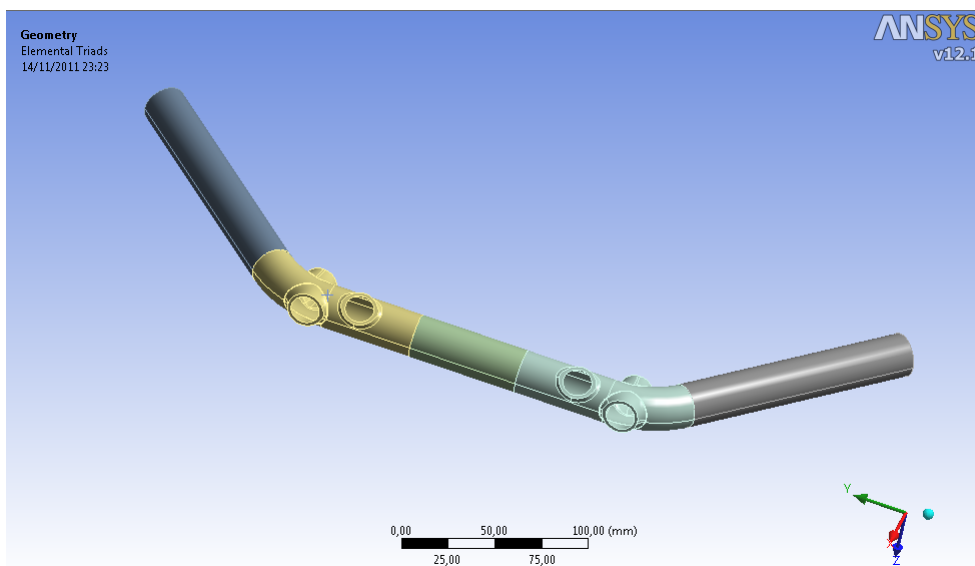


Figura 4.10: Suddivisione corpi

L'estrusione Sweep è essenzialmente una estrusione lungo un percorso. Viene sempre usata una superficie meshata di partenza, stessa tipologia di costruzione dell'estrusione semplice, a cui viene associato un percorso che può essere una curva o delle linee spezzate. In questo modo si ottiene una mesh "pulita" e con gli elementi corretti per le forme scelte.

Si riporta in figura 4.11 una parte del telaio meshata con l'algoritmo sweep.

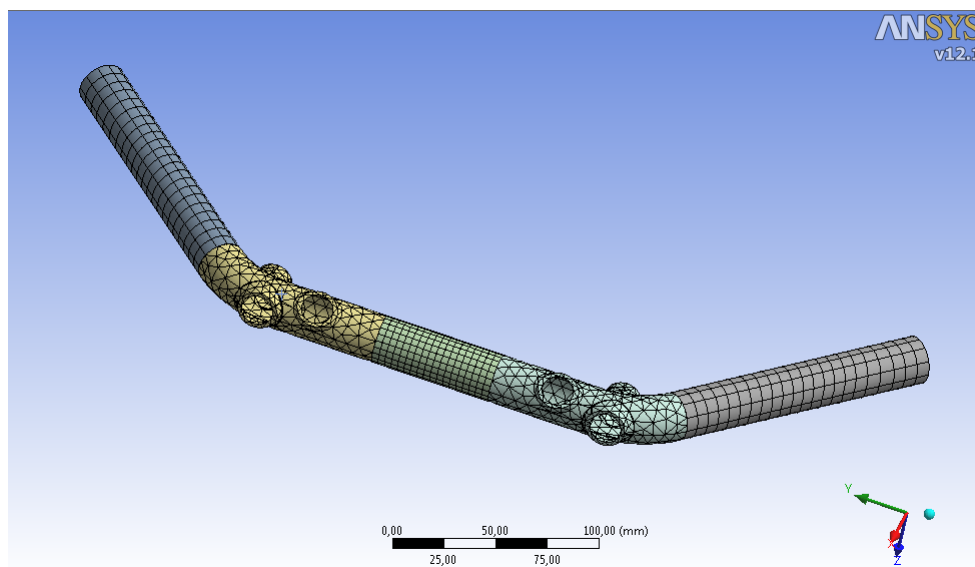


Figura 4.11: Esempio mesh

Inoltre avere un elemento di tipo Hexa, lungo un tubolare in composito ci permette di assegnare più facilmente le proprietà ortotrope del materiale stesso. Per fare questo si è reso necessario creare un sistema di riferimento locale per ogni elemento tubolare presente nel telaio.

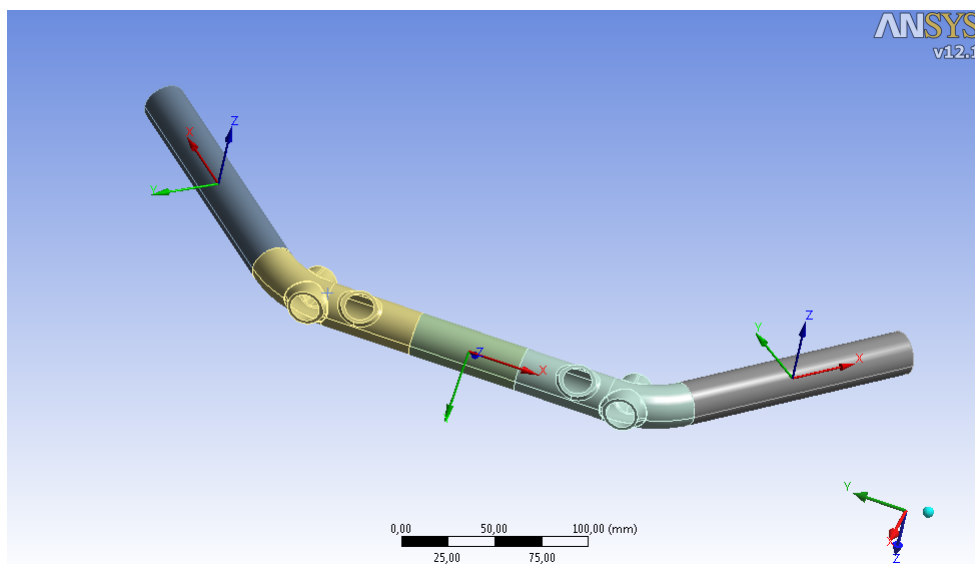


Figura 4.12: Sistemi di riferimento locale

Si è scelto di riportare un immagine 4.13 bicolore, per una più facile intuizione circa l'assegnazione dei materiali scelti per le varie parti che costituiscono il telaio.

Alle parti colorate in giallo nella successiva immagine del telaio, Main Hoop e Front hoop, non modificabili da regolamento SAE, è stato assegnato lo structural steel, già presente nel database di Ansys.

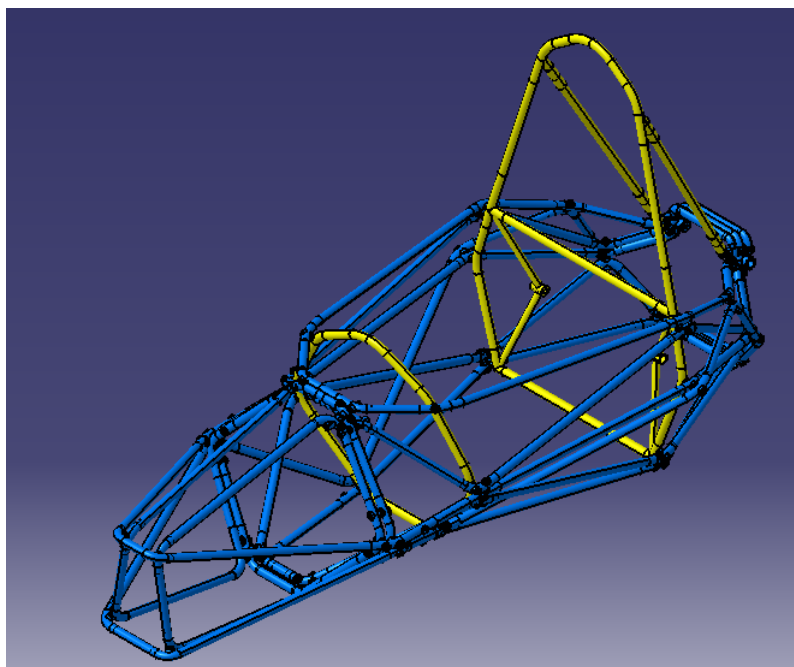


Figura 4.13: Assegnazione dei materiali

Per tutti gli inserti annegati nella nastratura, è stato assegnato l'alluminio, già presente nella libreria di Ansys.

Infine per le nastrature, in colore blu nell'immagine precedente, si è creato un nuovo materiale ortotropo avente le caratteristiche meccaniche del CYCOM 2020-36%-M55J-140-325, nastro unidirezionale termoidurente.

Il materiale utilizzato, come si è visto in precedenza, è stato caratterizzato sperimentalmente, mediante:

1. Prova di trazione
2. Prova di compressione clc
3. Prova di taglio nel piano
4. Prova di delaminazione

Dalle seguenti prove è stata ricavato un database con le proprietà meccaniche medie della singola lamina:

Modulo E_1 [GPa]	Modulo E_2 [GPa]	Modulo E_3 [GPa]	Poisson	G_{12} [GPa]	Densità [Kg/m ³]
284	10	3,2	0,27	36	1550

Considerando però che l'angolo di avvolgimento della nastratura è di 30°, con le lamine alternate in 10 strati di 0,2 mm, come si può capire meglio dall'immagine:

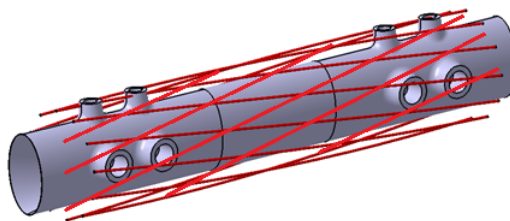


Figura 4.14: Direzioni nastro unidirezionale

Si sono ricalcolate le proprietà meccaniche con la teoria classica dei laminati, ed i valori ottenuti sono i seguenti:

Modulo E_1 [GPa]	Modulo E_2 [GPa]	Modulo E_3 [GPa]	Poisson	G_{12} [GPa]	Densità [Kg/m ³]
189	51	3,2	0,27	36	1550

Tali valori sono stati inseriti nella libreria di Ansys all'interno delle proprietà meccaniche del nuovo materiale ortotropo creato.

Il modello è stato vincolato con un Fixed support agli attacchi motore e agli attacchi scatolato, in modo da poter considerare il motore infinitamente rigido rispetto gli elementi che costituiscono il telaio. Tale vincolo blocca tutte le traslazioni e le rotazioni delle superfici selezionate. In più è stato

aggiunto un vincolo nella mezziera della linea dei carichi che serve a eliminare eventuali asimmetrie di calcolo dovute alla mesh. Tale vincolo puntuale, blocca tutte le traslazioni e lascia libere le rotazioni.

La coppia è stata creata applicando due forze di pari entità, ma di verso contrario, mediante l'ausilio di RBE2.

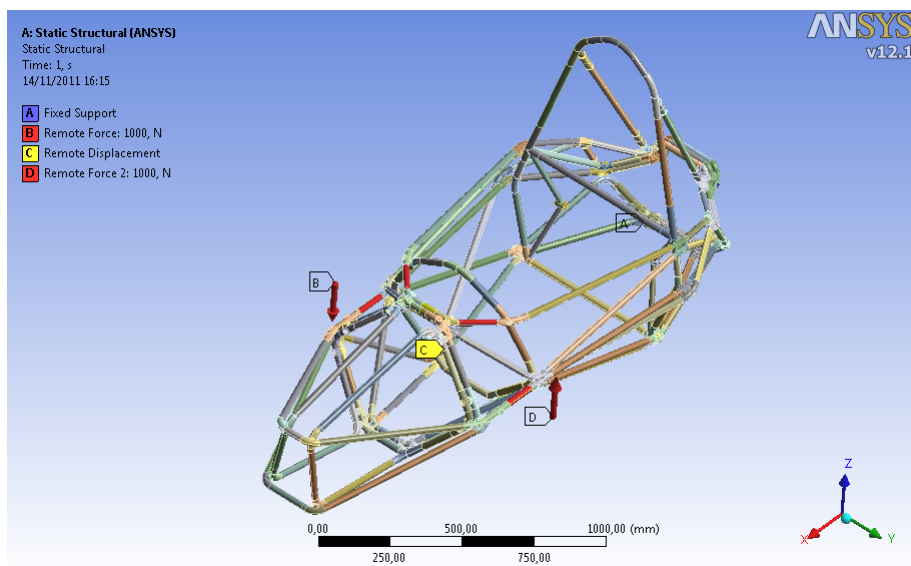


Figura 4.15: Modello numerico telaio nastrato

In prima analisi si è studiata la deformata totale del telaio, per individuare la presenza di eventuali errori dovuti a contatti mancanti o a moti di corpo rigido, non ammessi.

Dal plot del contour della deformata sono state individuate le due traslazioni associate ai nodi caricati, in modo da avere una stima immediata della rigidità del telaio.

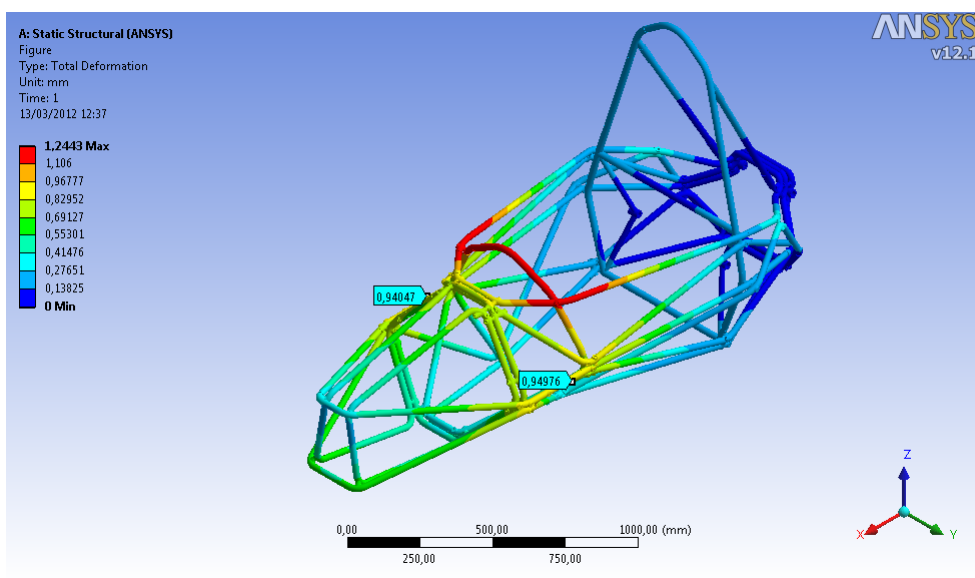


Figura 4.16: Deformata totale telaio nastrato in composito

Si nota come i due valori siano simili ma non uguali, nonostante il vincolo aggiunto per eliminare i restanti gradi di libertà.

Dalle due traslazioni, grazie alle assunzioni fatte in precedenza, si calcola la rotazione, e di conseguenza la rigidità torsionale della sezione trasversale coincidente con la linea dell'asse anteriore.

$$K_t = 3137 \left[\frac{Nm}{\circ} \right]$$

Oltre al calcolo di tale valore è stato realizzato un Path plot delle rotazioni lungo z di alcune sezioni trasversali del telaio, così da visualizzarne graficamente l'andamento fra assale anteriore e collegamento allo scatolato in alluminio.

	Forza Applicata [N]	Braccio [m]	Momento torcente [N*m]		
	1000	0,5	500,00		
	Larghezza [mm]	Spostamento dx [mm]	Spostamento sx [mm]	Rotazione [°]	Rigidità Complessiva [N*m/°]
0	680	0,94031	0,95147	0,159398544	3136,791517
200	680	0,79965	0,80767	0,135430371	3691,934062
400	708	0,60917	0,6194	0,099423553	5028,989437
600	744	0,34646	0,35768	0,054226143	9220,644783
800	780	0,17959	0,18931	0,027097965	18451,56976
1000	760	0,16471	0,16987	0,025223713	19822,61689
1200	618	0,10078	0,10222	0,018820458	26566,83443
1400	250	0,000622	0,00068674	0,000299941	1666993,876

Figura 4.17: Valori Path plot telaio nastrato in composito

Si riporta quindi l'andamento delle rotazioni lungo z del telaio in oggetto.

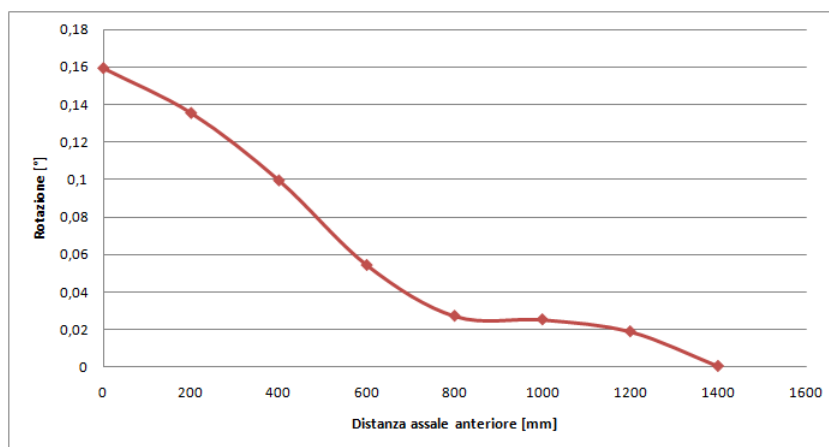


Figura 4.18: Andamento delle rotazioni lungo z telaio nastrato

Per meglio comprendere l'andamento è stato sovrapposto tale grafico all'immagine del telaio.

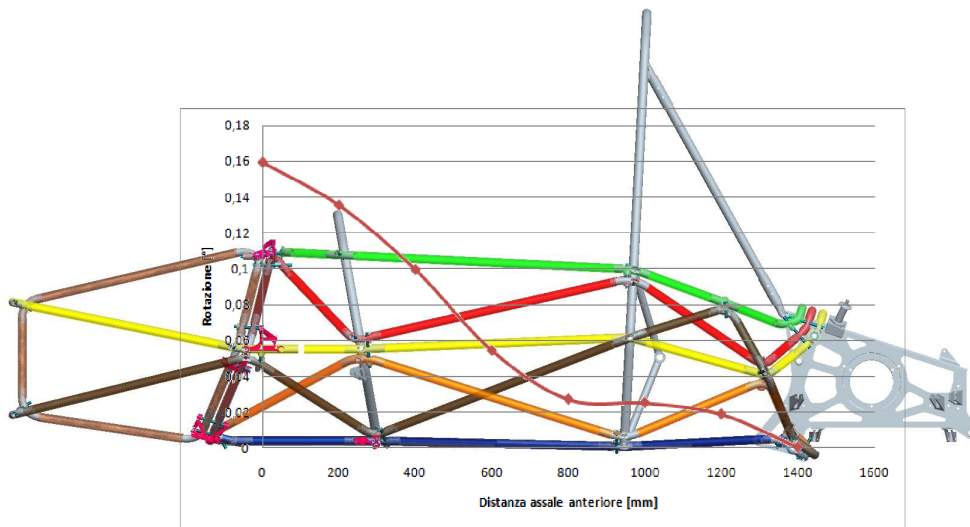


Figura 4.19: Sovrapposizione andamento delle rotazioni su geometria telaio nastrato

4.2.5 Calcolo della rigidezza torsionale telaio Formula SAE in tubolari d'acciaio

Allo stesso modo, la simulazione per il calcolo della rigidezza torsionale è stata realizzata in ambiente Ansys Workbench.

Il telaio è stato modellato con elementi tetra a 10 nodi dove non è stato possibile utilizzare gli Hexa a 20 nodi, che sono stati utilizzati nei tubolari per seguirne meglio la forma, per ottenere una migliore stima della rigidezza rispetto ad elementi beam.

Per eseguire questo tipo di modellazione, si è resa necessaria una preparazione del modello in ambiente CAD. Il modello è stato suddiviso in più parti, cercando di ricondurlo ad un insieme di parti elementari, tali per cui è stato possibile utilizzare un algoritmo di tipo sweep per la mesh.

Per questa simulazione non è stato necessario creare dei sistemi di riferimento locale per meglio assegnare le proprietà del materiale, vista la presenza di un unico materiale isotropo.

Il materiale scelto per il telaio è lo structural steel già presente nel database di Ansys.

Il modello è sempre stato vincolato con un incastro agli attacchi motore e agli attacchi scatolato, in modo da poter considerare il motore infinitamente rigido rispetto agli elementi che costituiscono il telaio. In più è stato aggiunto un vincolo nella mezzeria della linea dei carichi che serve a eliminare eventuali asimmetrie di calcolo dovute alla mesh. Tale vincolo puntuale, blocca tutte le traslazioni e lascia libere le rotazioni. Infine sono state applicate due forze di pari entità, ma di verso contrario, mediante l'ausilio di RBE2.

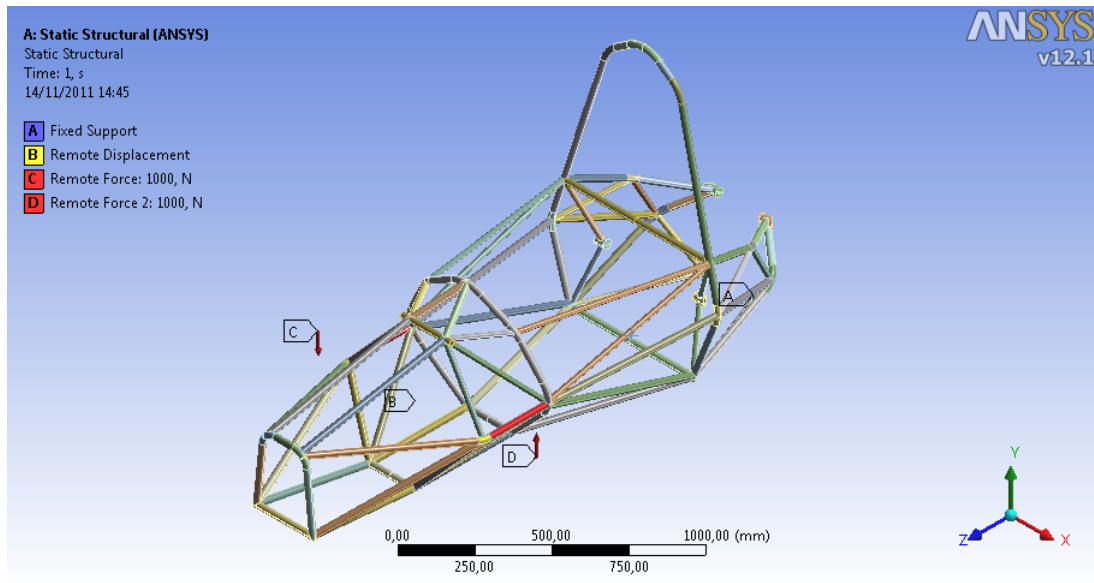


Figura 4.20: Modello numerico telaio nastrato

Si è analizzata la deformata totale del telaio, per individuare la presenza di eventuali errori dovuti a contatti mancanti o a moti di corpo rigido, non ammessi.

Dal plot della deformata sono state individuate le due traslazioni associate ai nodi caricati, in modo da avere una stima immediata della rigidità del telaio.

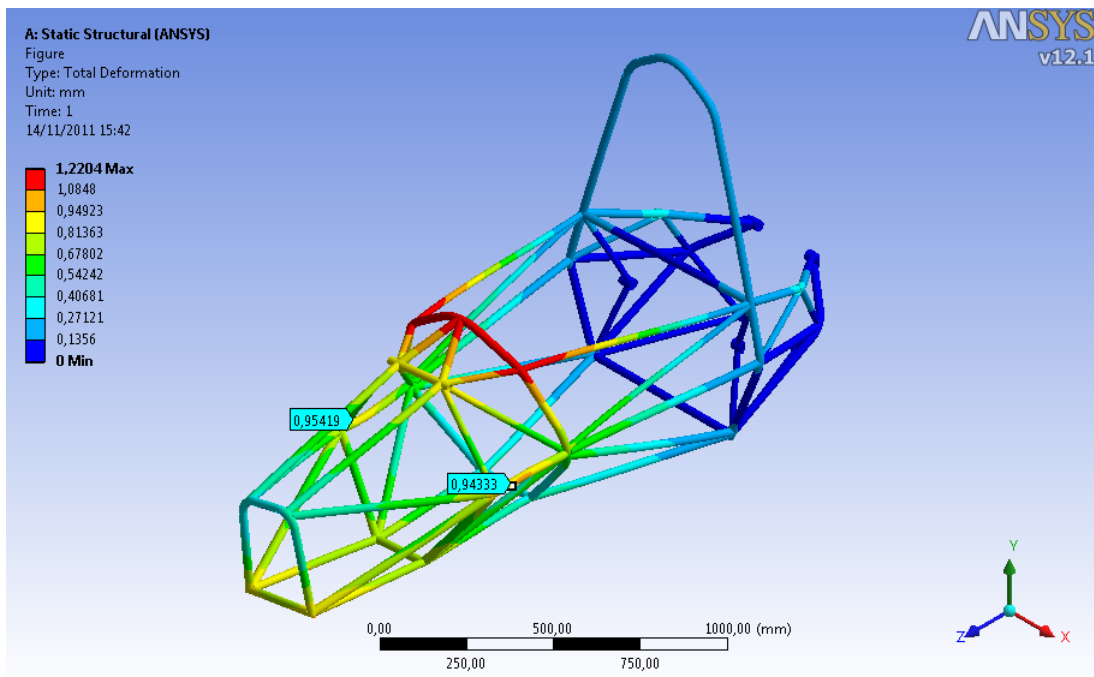


Figura 4.21: Deformata totale telaio nastrato in composito

Si nota come, anche in questo caso, i due valori siano simili ma non uguali, nonostante il vincolo aggiunto per eliminare i restanti gradi di libertà.

Dalle due traslazioni, grazie alle assunzioni fatte in precedenza, si calcola la rotazione e, di conseguenza, la rigidezza torsionale della sezione trasversale coincidente con la linea dell'asse anteriore.

$$K_t = 2862 \left[\frac{Nm}{^\circ} \right]$$

Oltre al calcolo di tale valore è stato realizzato un Path plot delle rotazioni lungo z di alcune sezioni trasversali del telaio, così da visualizzarne graficamente l'andamento fra assale anteriore e collegamento allo scatolato in alluminio.

	Forza Applicata [N]	Braccio [m]	Momento torcente [N*m]		
	1000	0,5	500,00		
	Larghezza [mm]	Spostamento dx [mm]	Spostamento sx [mm]	Rotazione [°]	Rigidezza Complessiva [N*m/°]
0	620	0,95	0,94	0,174659715	2862,709355
200	620	0,73	0,75	0,13677057	3655,757217
400	654	0,595	0,6	0,10469183	4775,921886
600	694	0,4	0,42	0,067698183	7385,722566
800	732	0,216	0,225	0,034518359	14485,04549
1000	730	0,127	0,128	0,020014279	24982,1638
1200	610	0,077	0,081	0,014840546	33691,4824
1400	288	0,00017	0,00035	0,000103451	4833219,467

Figura 4.22: Valori Path plot telaio tubolare in acciaio

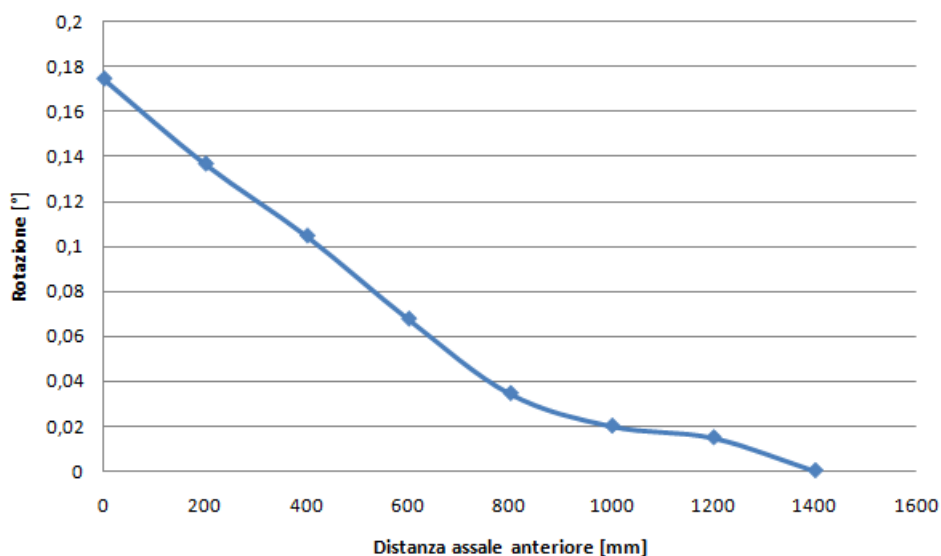


Figura 4.23: Andamento delle rotazioni lungo z telaio nastrato

Per meglio comprendere l'andamento è stato sovrapposto tale grafico all'immagine del telaio.

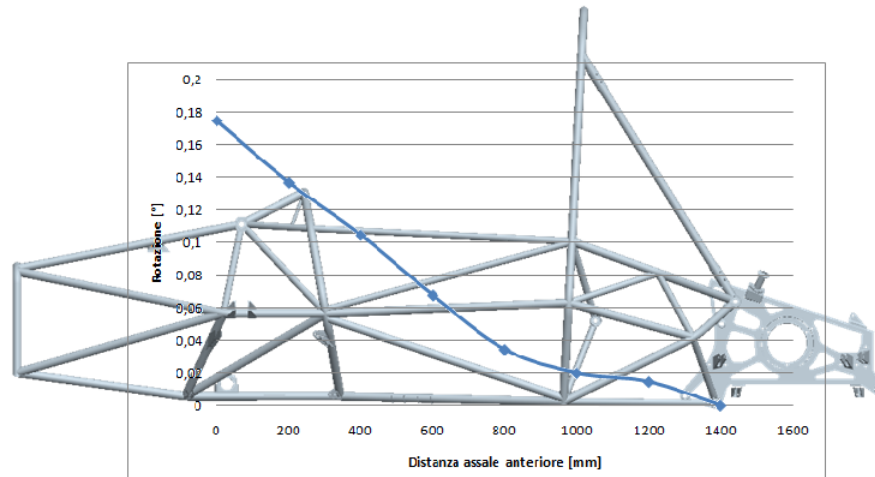


Figura 4.24: Sovrapposizione andamento delle rotazioni su geometria telaio in acciaio

4.2.6 Verifica sperimentale della Rigidezza torsionale

Terminata la realizzazione dell'intero telaio in acciaio della vettura, attraverso la collaborazione ed il supporto dell'azienda Marchesi & C., si è reso possibile condurre sullo chassis una prova di torsione sperimentale che ha riprodotto fedelmente quella simulata. Infatti grazie alla presenza di motore e scatola, che hanno svolto il ruolo di dima durante le fasi di realizzazione del retrotreno, si è potuto incastrare rigidamente lo scatolato posteriore in alluminio e andare a torcere lo chassis in corrispondenza dell'asse anteriore [66]. Ponendo dei comparatori in corrispondenza dei longheroni di base dello space frame, si è misurato lo spostamento della struttura all'altezza dell'asse anteriore, dovuto alla coppia applicata tramite un braccio e una massa nota.



Figura 4.25: Allestimento prova

Dalle misurazioni, tramite semplici calcoli, si è potuto risalire all'angolo di torsione della struttura e, da questo, al valore misurato della rigidezza torsionale del telaio che, come detto, rappresenta insieme alla massa il parametro fondamentale.

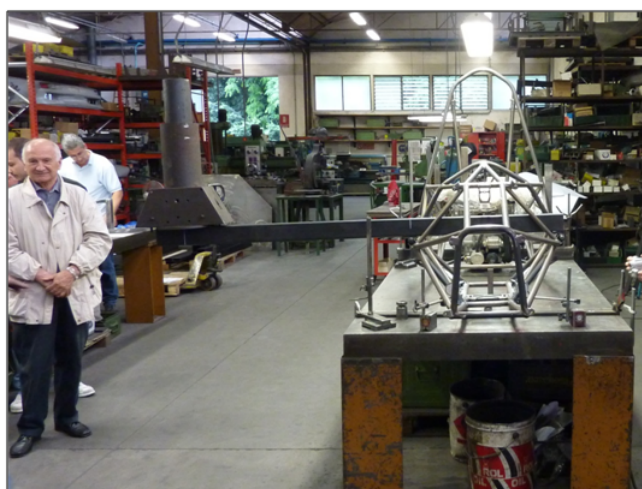


Figura 4.26: Prova di torsione

Distanza Longitudinale dall'asse anteriore verso l'asse posteriore [mm]	Rotazione Dx [°]	Rotazione Sx [°]	Media [°]	Posizione Disegno
0	0,916732472	0,5602254	0,73847894	Sotto il Rocker Anteriore
200	0,662084563	1,069521218	0,86580289	Prima del Front Hoop
400	0,582668944	0,854581118	0,71862503	Tra Main Hoop e Front Hoop
600	0,53759003	0,481001606	0,50929582	Tra Main Hoop e Front Hoop
800	0,60077128	0,400514187	0,50064273	Tra Main Hoop e Front Hoop
1000	0,437531407	0,395861749	0,41669658	Dopo Main Hoop
1200	0,667241989	0,377136777	0,52218938	Prima della scatola di Alluminio
1400	0,482490775	0,120622694	0,30155673	Scatola Alluminio
1580	0	0	0	Incastro Scatola Alluminio

Figura 4.27: Valori rotazione telaio

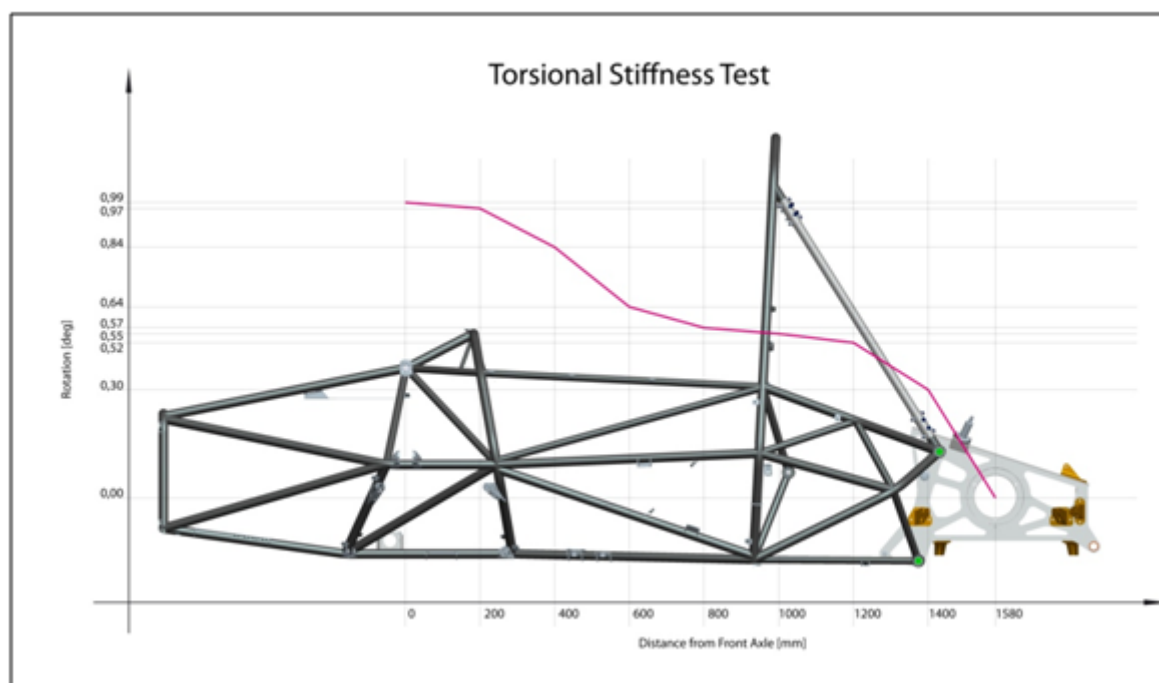


Figura 4.28: Andamento reale della rigidità dello chassis lungo le sue diverse sezioni trasversali

Nel grafico sopra, è riportato l'andamento reale della rigidità dello chassis lungo le sue diverse sezioni trasversali. La rigidità torsionale reale della struttura si attesta intorno ai 2154 Nm/grado.

Valutazione del relativo risparmio in peso nel confronto iso-rigidezza con il telaio in tubolare d'acciaio del campionato 2009

I valori numerici ottenuti per l'andamento delle rigidezze torsionali, fra l'asse anteriore e lo scatolato in alluminio, dei due telai analizzati mediante calcolo CAE, sono riassunti nel grafico riportato di seguito.

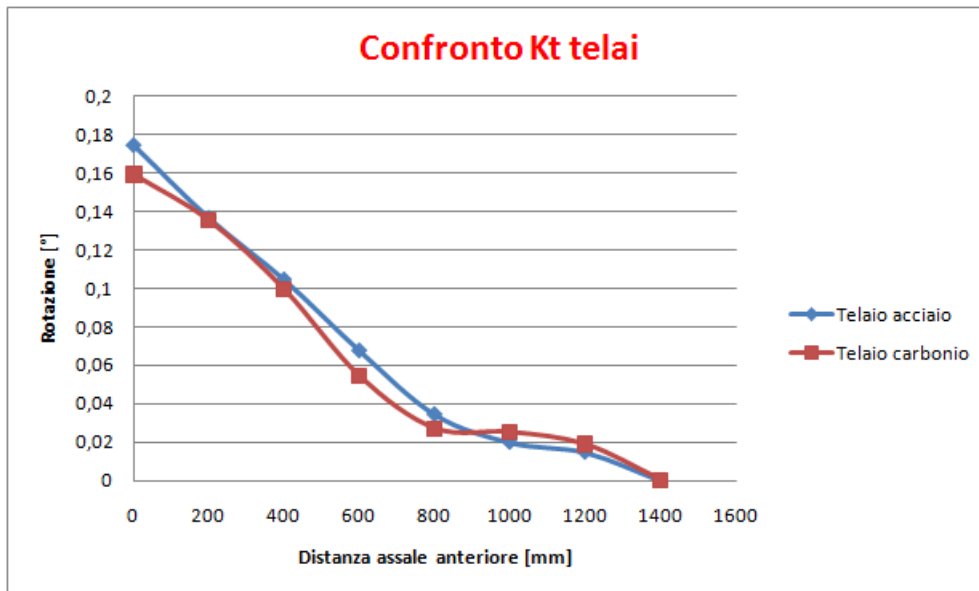


Figura 4.29: Confronto andamenti rigidezze torsionali

Si nota, immediatamente, una pendenza minore del telaio nastrato in carbonio e quindi una rigidezza maggiore, dovuta probabilmente ad un sovradimensionamento dello spessore della nastatura. In tal caso sarà possibile ridurre ulteriormente tale spessore, diminuendo di conseguenza la rigidezza e ottenendo un valore più simile a quello ottenuto per il telaio tubolare in acciaio. Inoltre con la diminuzione dello spessore si ha un abbassamento del peso complessivo ed una diminuzione dei costi.

Si evidenzia una minore rotazione globale del telaio nastrato, ma con un andamento meno costante della rigidezza. Si può osservare un aumento della rigidezza in corrispondenza della zona centrale e della zona sospensioni anteriore, che viene motivato con la presenza di una triangolazione supplementare rispetto al telaio in acciaio e con la presenza nella zona anteriore di un elevato infittimento di inserti e giunzioni causato dalla complessità geometrica della zona.

Si possono fare ora alcune considerazioni sul peso, ricordando che l'obiettivo prefissato era quello di mantenere invariata la rigidezza e diminuire il peso del telaio.

Il peso stimato al CAD del telaio a traliccio in acciaio è di circa 29 KG, mentre il relativo peso del telaio nastrato in composito è di circa 24,7 Kg.

Si ha una diminuzione del peso di circa il 15%, e questo porta sicuramente ad un aumento delle prestazioni e ad una diminuzione dei consumi.

Si fanno anche alcune considerazioni su un altro parametro fondamentale il rapporto Rigidezza /peso.

Si calcola tale parametro per il telaio a tubolari d'acciaio, che possiede un peso di 29 Kg ed una rigidezza calcolata al CAE di 2862 [Nm/°]

$$\frac{\text{Rigidezza}}{\text{peso}} = \frac{2862}{29} = 99 \left[\frac{\text{Nm}}{\text{Kg}^\circ} \right]$$

Infine per per il telaio nastrato in composito, che possiede un peso di 24,7 Kg ed una rigidezza calcolata al CAE di 3137 [Nm/°]

$$\frac{\text{Rigidezza}}{\text{peso}} = \frac{3137}{24,7} = 127 \left[\frac{\text{Nm}}{\text{Kg}^\circ} \right]$$

Si evince un aumento del 28% del rapporto, dovuto ad un abbassamento del peso totale di 4,3Kg e ad un buon miglioramento della rigidezza torsionale.

Verifica sperimentale di una parte elementare del telaio

Il modello di calcolo utilizzato è di tipo elastico lineare e non ha potuto tenere conto di eventuali problematiche di adesione tra nastratura e inserti, né di delaminazioni del composito. Al fine di investigare eventuali problemi di adesione tra nastratura e inserto dovuti fondamentalmente da mismatch termici in fase di polimerizzazione, i modi di rottura, oltre a determinare il vero modulo elastico longitudinale del laminato e la resistenza a trazione si è proceduto alla pianificazione di prove a trazione di provini rappresentativi di una parte elementare di telaio.

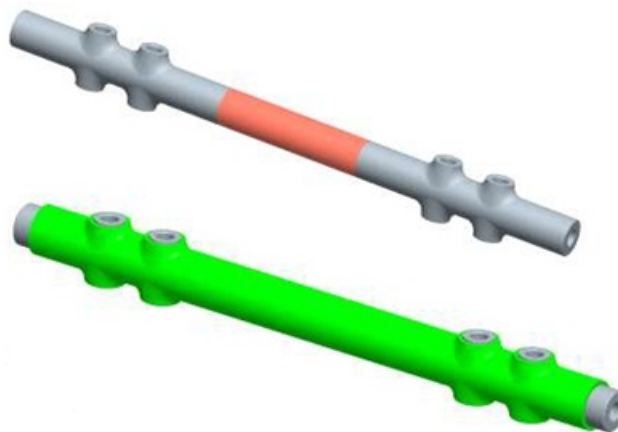


Figura 4.30: Parte elementare del telaio modellata al cad

L'obiettivo è l'individuazione delle caratteristiche meccaniche da utilizzare per il calcolo del telaio:

- E_l , modulo di elasticità longitudinale

- Resistenza a trazione
- Modalità di rottura
- Valutazioni circa la resistenza a taglio dell'accoppiamento nastratura-inserito, non valutabili da calcolo CAE
- Correlazione numerico sperimentale

Sono stati costruiti 4 campioni di tale giunzione, laminati con diversi spessori, e con posizionamento del nastro UD a $\pm 30^\circ$ rispetto alla direzione longitudinale del tubolare. Le diverse configurazioni dei provini sono le seguenti:

1. Un provino laminato a 8 ply
2. Due provini laminati a 6 ply
3. Un provino laminato a 4 ply

4.2.7 Prove a trazione su parte elementare del telaio

I provini sono costituiti da due inserti in alluminio ed una parte nastrata con CYCOM 2020-36%-M55J-140-325. Gli inserti in alluminio sono stati costruiti dalla SM s.r.l., di Calderara, mentre la laminazione è stata realizzata manualmente dalla ditta PRC, Picasso Racing component di Modena (4.31).

La campagna di prove sperimentali è stata effettuata su una macchina servo-idraulica Instron 8033 con cella di carico di 250 kN calibrata a 25 kN per una maggiore sensibilità nell'acquisizione dei dati.

Le prove di trazione e compressione sono state condotte in controllo di posizione ad una velocità di 0,02 mm/sec.

I dati sono stati acquisiti tramite software Station Manager versione 3.1, MTS Corporation.

Per la misura della deformazione nelle prove di trazione e compressione sono stati utilizzati degli estensimetri biassiali della Luchsinger, collegati a ponte intero, con resistenza $350 \pm 0.4\% \Omega$ e gauge factor $+2.01 \pm 0.5$, centrati lungo l'asse del carico.

Per l'esecuzione delle prove a trazione sono state progettati e costruiti degli afferraggi idonei (Fig.4.33).

Le scelte costruttive delle attrezzature in oggetto sono state determinate dall'esigenza di eliminare qualsiasi tipo di flessione dal provino durante l'esecuzione della prova. Inoltre il trasferimento del carico di trazione avviene attraverso l'inserimento di due perni di diametro 10mm, all'interno dell'inserito in alluminio, per evitare qualsiasi tipo di afferraggio che possa improntare il provino e rovinare quindi la fibra localmente.

In figura viene riportata la foto di uno dei provini prima e dopo la laminazione.

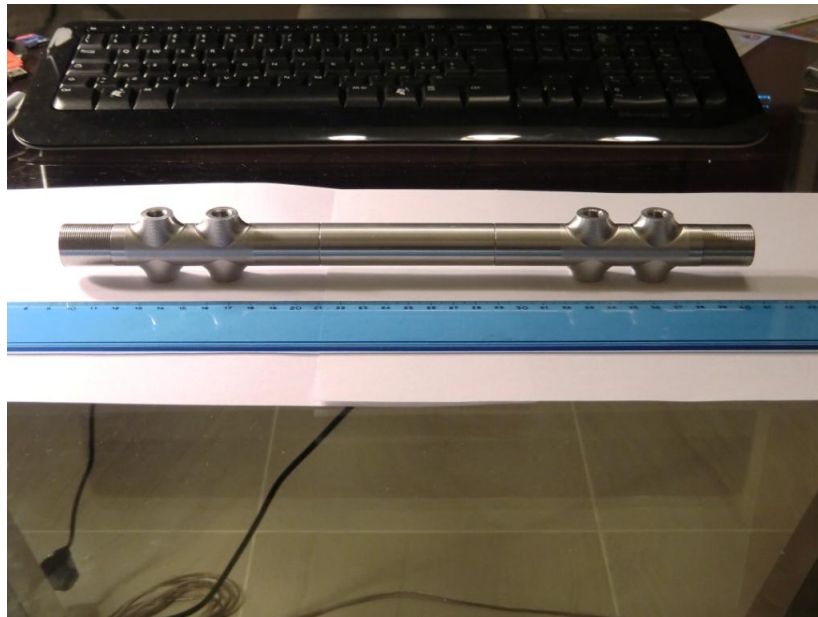


Figura 4.31: Parte elementare nastrata



Figura 4.32: Parte elementare nastrata



Figura 4.33: Attrezzatura per prova a trazione

In 4.34 sono riportate tutte le curve di compressione dei 4 campioni per un confronto diretto delle caratteristiche meccaniche.

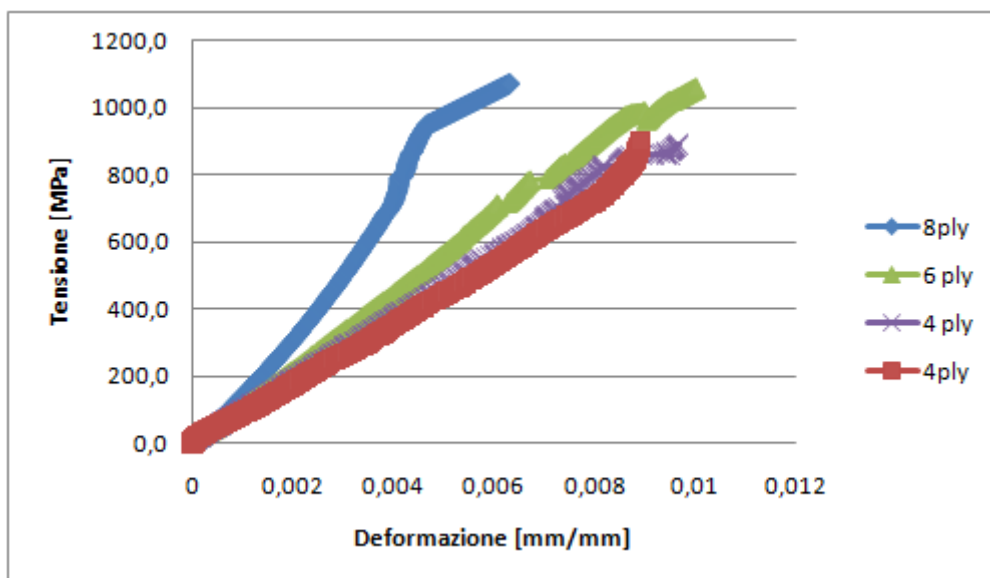


Figura 4.34: Tensione-deformazione provini parte elementare

Si riportano in tabella i valori delle singole parti elementari di tutte le grandezze misurate per le prove a trazione.

Tabella 4.1: Riassunto prove su provini parti elementari telaio

	F^{tu} [MPa]	E [GPa]
8 ply	1073	154,5
6 ply	1060	109
4 ply	918	96,5
4 ply	870	89,3

Si evince che i valori utilizzati del modulo di elasticità longitudinale per il calcolo della rigidezza torsionale del telaio nastrato in composito, sono abbastanza simili a quelli trovati sperimentalmente. Infatti considerando il Layup ad 8 ply con un angolazione delle fibre di $\pm 30^\circ$, rispetto al Layup a 10 ply con angolazione delle fibre di $\pm 30^\circ$, si ha una differenza di modulo di elasticità del 19%.

Per individuare un valore di rigidezza più simile alla realtà si è rieseguito il calcolo, riaggiornando le proprietà meccaniche con i nuovi valori sperimentali trovati; in particolare sono state utilizzate le grandezze trovate per il provino a 8 ply. La scelta eseguita dipende dallo spessore del provino testato, che si avvicina in maniera significativa al valore ipotizzato da calcolo.

Si riporta in figura 4.35 la modalità di rottura del provino a seguito della prova di trazione eseguita.



Figura 4.35: Modalità di rottura del provino

Dall'immagine si evince come il buon aggrappaggio delle fibre sull'inserto di alluminio abbia portato da una rottura del provino nella parte longitudinale nastrata in carbonio. Tale risultato indica che i vincoli di forma scelti per l'inserto in alluminio, sono funzionali per un buon comportamento della giunzione.

4.2.8 Calcolo della rigidezza torsionale telaio con valori sperimentali della parte elementare

Si è studiata la deformata totale del telaio nastrato in composito.

Dal plot del contour della deformata sono state individuate le due traslazioni associate ai nodi caricati, in modo da avere una stima immediata della rigidezza del telaio.

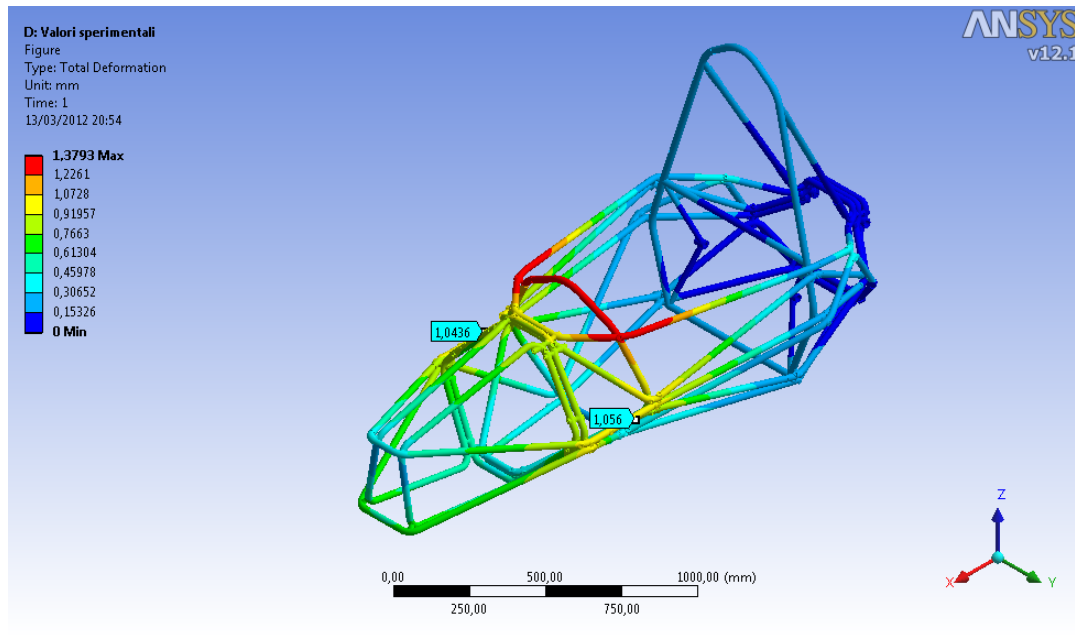


Figura 4.36: Deformata totale telaio nastrato in composito

Dalle due traslazioni, grazie alle assunzioni fatte in precedenza, si calcola la rotazione, e di conseguenza la rigidezza torsionale della sezione trasversale coincidente con la linea dell'asse anteriore.

$$K_t = 2826 \left[\frac{Nm}{^\circ} \right]$$

Di seguito si riportano i valori delle rotazioni lungo z di alcune sezioni trasversali del telaio, fra assale anteriore e collegamento allo scatolato in alluminio.

	Forza Applicata [N]	Braccio [m]	Momento torcente [N*m]			
	1000	0,5	500,00			
	Larghezza [mm]	Spostamento dx [mm]	Spostamento sx [mm]	Rotazione [°]	Rigidezza Complessiva [N*m/°]	
0	680	1,0436	1,056	0,176909145	2826,309515	
200	680	0,88704	0,89818	0,150419958	3324,026986	
400	708	0,66668	0,67698	0,108737355	4598,235828	
600	744	0,36968	0,38085	0,057798658	8650,719914	
800	780	0,19764	0,20921	0,029885626	16730,45123	
1000	760	0,17766	0,18338	0,027218511	18369,85142	
1200	618	0,094779	0,09816	0,017887687	27952,18898	
1400	250	0,00041044	0,00041633	0,000189482	2638776,885	

Figura 4.37: Valori Path plot telaio nastrato

Nell'immagine è stato inserito 4.38 il path plot dei valori trovati.

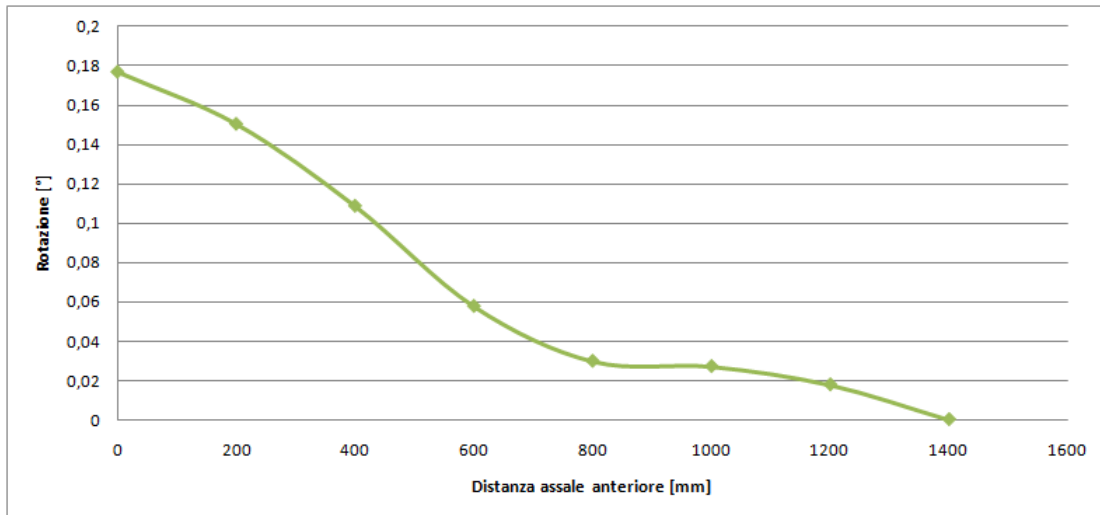


Figura 4.38: Andamento delle rotazioni lungo z del telaio

In ultima analisi è stato creato un immagine del telaio con sovrapposto il path plot delle rotazioni, per meglio comprendere l'andamento.

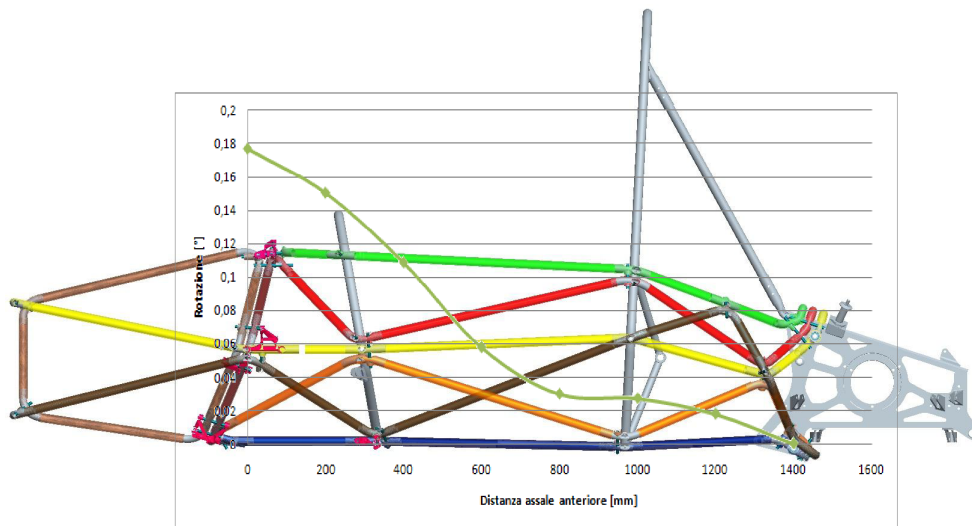


Figura 4.39: Sovrapposizione andamento delle rotazioni su geometria telaio nastrato

Infine si riesegue il rapporto rigidezza /peso per il nuovo calcolo sul telaio, che possiede un nuovo peso di 23 Kg, considerando una laminazione a 8 ply, ed una rigidezza calcolata al CAE pari a 2826 [Nm/°]

$$\frac{\text{Rigidezza}}{\text{peso}} = \frac{2826}{23} = 123 \left[\frac{\text{Nm}}{\text{Kg}^\circ} \right]$$

Si ricorda che il telaio a tubolari d'acciaio possiede un peso di 29 Kg ed una rigidezza calcolata al CAE di 2862 [Nm/°]

$$\frac{\text{Rigidezza}}{\text{peso}} = \frac{2863}{29} = 99 \left[\frac{Nm}{Kg} \right]$$

Si ha un aumento del 24% del rapporto ed un abbassamento del peso totale di 6 Kg.

Tale rapporto può essere confrontato con il rapporto rigidezza/peso del telaio in tubolari d'acciaio, considerando la rigidezza ottenuta sperimentalmente.

Il rapporto con tali valori è pari a:

$$\frac{\text{Rigidezza}}{\text{peso}} = \frac{2154}{29} = 74 \left[\frac{Nm}{Kg} \right]$$

Si evince un aumento del 66% del rapporto, dovuto ad un abbassamento del peso totale di 6Kg e ad un miglioramento del 32% della rigidezza torsionale ottenuta sperimentalmente.

Capitolo 5

Conclusioni e sviluppi futuri

In questo lavoro di tesi, in base allo studio svolto sulle tecniche di produzione di componenti strutturali in materiale composito, si è pensato di disegnare un telaio di vettura sportiva ad alte prestazioni, realizzato con l'impiego di leghe leggere con innovativi processi di giunzione e materiali compositi a basso costo in ottica riduzione peso componente.

La caratterizzazione di tale telaio è stata eseguita mediante l'utilizzo del calcolo strutturale, validato da prove sperimentali:

1. Calcolo della rigidezza torsionale del telaio nastrato della Formula SAE con proprietà meccaniche individuate mediante prove statiche su provini standardizzati
2. Calcolo della rigidezza torsionale del telaio tubolare in acciaio della Formula SAE 2009
3. Correlazione numerico sperimentale della rigidezza torsionale del telaio in tubolare d'acciaio
4. Valutazione del risparmio in peso nel confronto iso-rigidezza fra i telaio nastrato ed il telaio tubolare
5. Verifica sperimentale di una parte elementare del telaio mediante prova di trazione
6. Calcolo della rigidezza torsionale del telaio nastrato con nuove proprietà meccaniche riscontrate per la parte elementare

Nella fase iniziale è stato eseguita un'analisi di fattibilità, uno studio funzionale ed una prima progettazione di una tecnologia di produzione per nastratura automatizzata di parti strutturali in materiale composito. L'obiettivo di tale tecnologia era fornire una soluzione innovativa al problema della giuntabilità di tali componenti. Dopo aver effettuato delle valutazioni di tipo geometrico e funzionale sulla struttura da realizzare in merito al processo, si è eseguita una prima progettazione della tecnologia e del telaio nastrato in materiale composito.

Nella seconda fase si è eseguito un primo calcolo di rigidezza torsionale sul telaio in composito. Si è suddiviso il modello in varie parti elementari cercando di ottenere una buona discretizzazione, per

meglio assegnare le proprietà ortotrope del materiale. Le proprietà meccaniche assegnate al modello, derivano da una caratterizzazione statica completa su due tipologie di materiale.

Inoltre dopo aver eseguito un calcolo di rigidezza torsionale sul telaio in tubolari d'acciaio della formula SAE del 2009, si è cercata una correlazione con la prova sperimentale eseguita sempre sullo stesso telaio.

Dai buoni risultati ottenuti per il telaio in acciaio, è ragionevole supporre che il valore della rigidezza del telaio nastrato in composito sia da tenere in considerazione.

Si è quindi eseguito un primo confronto fra le rigidzze individuate mediante il calcolo strutturale e i pesi dei due telai in termini del rapporto Rigidzza /peso.

Per il telaio a tubolari d'acciaio, si è ottenuto un valore pari a $99[\frac{Nm}{Kg^\circ}]$, mentre per il telaio nastrato in materiale composito il valore è pari a $127[\frac{Nm}{Kg^\circ}]$.

Si è riscontrato un aumento del 28% del rapporto, dovuto ad un abbassamento del peso totale di 4,3Kg e ad un miglioramento del 10% della rigidzza torsionale.

Poiché le proprietà meccaniche del nastro unidirezionale scelto, inserite nel primo calcolo di rigidzza, derivano da provini standard che non rispecchiano esattamente la geometria reale del telaio, si è pensato di costruire delle parti elementari di quest'ultimo. Tali parti sono state poi caratterizzate, mediante una prova a trazione eseguita su quattro campioni laminati con diversi spessori. I risultati di tali prove, ed in particolare il modulo di elasticità longitudinale e la resistenza a trazione, sono stati inseriti come proprietà meccaniche in un ultimo calcolo di rigidzza torsionale.

Si è pensato infine di confrontare il valore della rigidzza del telaio nastrato ricavato, sia con il valore ricavato dal calcolo che con il valore sperimentale individuato per il telaio in acciaio.

Rigidzza torsionale telaio nastrato con unidirezionale Cycom:

$$\frac{Rigidzza}{peso} = \frac{2826}{23} = 123[\frac{Nm}{Kg^\circ}]$$

Si ricorda che il telaio a tubolari d'acciaio possiede un peso di 29 Kg ed una rigidzza calcolata al CAE di 2862 [Nm/°]

$$\frac{Rigidzza}{peso} = \frac{2863}{29} = 99[\frac{Nm}{Kg^\circ}]$$

Dai valori riportati si riscontra un aumento del 24% del rapporto rigidzza/peso ed un abbassamento del peso totale di 6 Kg.

Infine si è deciso di confrontare tale rapporto con il rapporto rigidzza/peso del telaio in tubolari d'acciaio, considerando la rigidzza ottenuta sperimentalmente.

Il rapporto con tali valori è pari a:

$$\frac{Rigidzza}{peso} = \frac{2154}{29} = 74[\frac{Nm}{Kg^\circ}]$$

Il risultato è un aumento del 66% del rapporto, dovuto ad un abbassamento del peso totale di 6Kg e ad un miglioramento del 32% della rigidzza torsionale ottenuta sperimentalmente.

La diminuzione di peso porta sicuramente ad un aumento delle prestazioni e ad un minore consumo in termini di carburante, fattore molto importante per la relativa prova di endurance.

Si riporta di seguito un confronto grafico fra le rigidzze ricavate dai tre calcoli precedentemente effettuati.

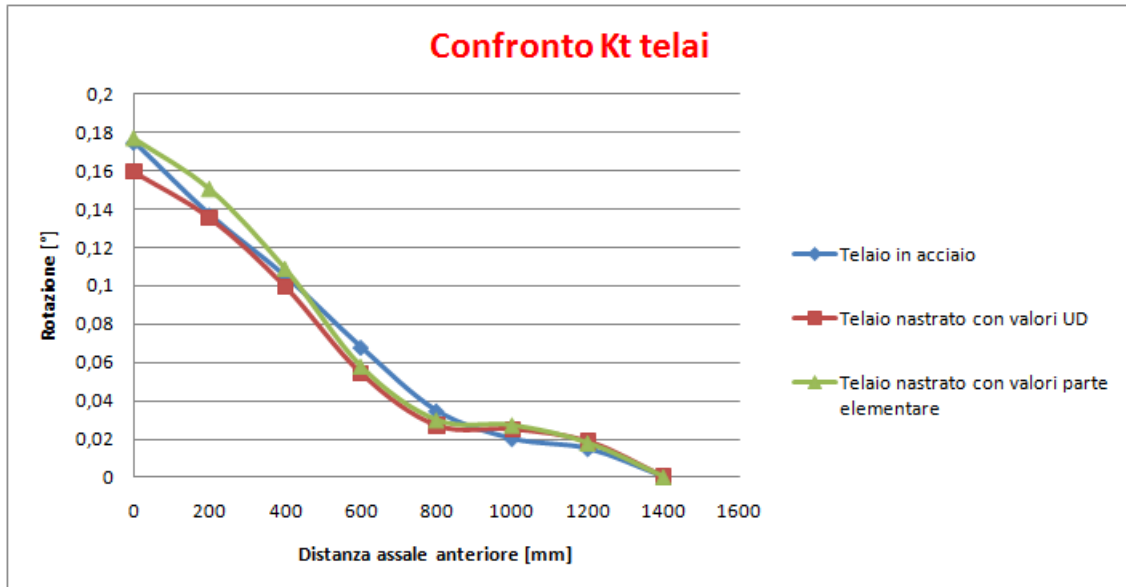


Figura 5.1: Confronto rigidzze telai calcolati

Dal grafico si nota una pendenza minore del telaio nastrato in carbonio (calcolato con le proprietà meccaniche dei provini standard) e quindi una rigidzza maggiore, rispetto a quello in acciaio, dovuta probabilmente ad un sovradimensionamento dello spessore della nastratura. Allo stesso modo si evince una pendenza leggermente maggiore per il telaio nastrato, avente le proprietà meccaniche della parte elementare testata sperimentalmente, e di conseguenza una rigidzza leggermente inferiore a quella calcolata per il telaio tubolare in acciaio.

Proseguendo con le conclusioni si può dire che il confronto grafico delle tre rigidzze ha evidenziato una maggiore rotazione globale del telaio nastrato, rispetto a quello in acciaio ed una diminuzione della rigidzza in corrispondenza della zona motore e della zona sospensioni anteriore.

Inizialmente si era pensato con il dimensionamento a pari rigidzza dei singoli tubi tra carbonio e acciaio e la distanza maggiore rispetto all'asse neutro di rotazione, di ottenere una rigidzza superiore del telaio di carbonio nella zona centrale. Le misure mostrano proprio un aumento di tale rigidzza in questa zona.

Per sopperire alla non costanza della rigidzza torsionale sarebbe opportuno ottimizzare il disegno del telaio, modificando le direzioni e gli spessori di laminazione degli anelli costitutivi del telaio. In futuro si dovranno, quindi, proseguire le analisi cercando di diminuire tale gap.

Inoltre a seguito di queste considerazioni, sarebbe necessario continuare lo sviluppo del telaio, con l'obiettivo di eseguire un primo prototipo da testare sperimentalmente.

Infine si dovrà condurre una stima del lotto economico di produzione del telaio oggetto di studio.

Ringraziamenti

Vorrei ringraziare in primo luogo le due persone che mi hanno sostenuto ed aiutato nel raggiungimento di questo traguardo: la mia ragazza Barbara e mia mamma Rosanna.

Un ringraziamento davvero sentito va al mio professore di riferimento, Prof. Ing. Pier Gabriele Molari e a tutto il gruppo di ingegneri di “Costruzioni di macchine”: Federico Maldini, Andrew Guzzomi, Carlo Peressini, Mirko Maraldi e Adrian Lutey.

Grazie anche ai tecnici del laboratorio Diem che hanno favorito la realizzazione di questa tesi: Dino Baluzzi, Vanda Roversi, Stefano Monti e Lauro Cionci. Ringrazio inoltre l'amico ing. Piero Morelli, che ha passato diverse serate dopo il lavoro in laboratorio con me, permettendomi di ultimare le prove.

Un doveroso e particolare ringraziamento va anche agli ingegneri Enrico Belvederi e Francesca De Santis, che hanno permesso e favorito il proseguimento dei miei studi per questo dottorato; ringraziamento esteso naturalmente a tutto il reparto prototipi della Cesab s.p.a, che mi ha aiutato nella realizzazione di alcuni provini: gli amici Massimo, Giorgio, Abi, Stefano e Roberto.

Infine un sentito grazie a tutte le persone che in qualsiasi modo mi hanno aiutato e sostenuto durante questi tre anni e mezzo.

Con riconoscenza,

Gianni

Elenco delle figure

1.1	Aspetto di diversi tessuti in fibra	4
1.2	Resistenza (temperatura) per fibre di carbonio	8
1.3	Struttura fibrillare delle fibre di aramide: rottura per flessione (a) e trazione (b)	14
1.4	Kink bands in fibre di aramide soggette a compressione severa.	15
1.5	Effetto della temperatura sulla resistenza a trazione (a) e modulo (b) di yarn di aramide Kevlar 49 secchi e umidi	18
1.6	Resistenza a fatica di fibre di aramide	18
1.7	Creep in Kevlar 29 e Kevlar 49 al 50% della resistenza a rottura	19
1.8	Comportamento tensione-deformazione in trazione e compressione di fibre di aramide	19
1.9	Stabilità termica; analisi termogravimetrica per 20 °C /min in azoto	20
1.10	Tipi di filati	21
1.11	Architettura delle fibre per compositi [2]	22
1.12	Armatura di tipo Plain-Wave	23
1.13	Armatura di tipo Twill-Wave	24
1.14	Armatura di tipo Satin-Wave	24
1.15	Trasferimento delle proprietà da fibra a tessuto (Gurit)	26
1.16	Convenzione dei segni per il Standard Laminate Code	27
1.17	Examples of 3D woven preforms: (a) cylinder and flange; (b) egg crate structures; (c) turbine rotors woven by Techniweave Inc.; and (d) various complex shapes woven by Shikishima Canvas Co., Ltd. (Courtesy of the Techniweave Inc. and Shikishima Canvas Co. Ltd.) [3]	31
1.18	Tessuti multiassiali (non-ondulati)	32
1.19	Preforma non-ondulata 3D	32
1.20	Geometria di preforma wave 3D polare	33
1.21	Deformazione di preforma cilindrica 3D a formare un bordo d'attacco	33
1.22	Tessuto magliato di tipo warp e weft	34
1.23	Preforma 3D braided (fonte 3tex.com)	35
1.24	Il tubo braided è deformato in una forma ad H e cuciture vengono eseguite lungo le linee tratteggiate	35
1.25	Preforma realizzata in overbraiding	36

1.26	Forme di fibre	37
1.27	Forme di fibre di vetro	38
1.28	Processo di polimerizzazione	48
1.29	Diagramma T.T.T.	49
1.30	Resistenza a trazione vs temperatura, compositi in vetro-poliestere con contenuto di vetro 40%	57
1.31	Performance dei compositi in matrice poliestere nei test di resistenza alla fiamma[13]	58
1.32	Confronto del comportamento dei microcracking dei laminati in resine cianato-estere e in resine epossidiche (rinforzati con fibra di grafite XN70A, modulo > 690 GPa). Fonte: Nippon Graphite Fiber Corporation	67
1.33	Compositi con matrice termoplastica: (a) radar di velivolo ed (b) elementi stampati. .	71
1.34	Confronto delle proprietà termiche dei Polimeri	79
1.35	Confronto del modulo dei polimeri	80
1.36	Confronto dell'allungamento a rottura dei polimeri	80
1.37	Confronto della resistenza all'impatto Izod notched dei polimeri	81
1.38	Assemblaggio del A340-500/600, ala fissa, della Fokker Aerostructures	83
2.1	Caratteristiche meccaniche dipendenti dalla frazione di fibra e dal tipo di rinforzo usato	86
2.2	Formatura in stampo	90
2.3	Disposizione dei materiali	91
2.4	Manual lay-up di prepreg con fibre tessute di carbonio	92
2.5	Debulking del lay-up di una auto monoscocca da corsa	94
2.6	Ciclo di cura svolto in autoclave	96
2.7	Testa del tape-laying	98
2.8	Passata	99
2.9	Deposizione su geometria complessa	101
2.10	Premix	105
2.11	Componenti aeronautici	105
2.12	Processo	107
2.13	Schema del processo	110
2.14	INJECTION-COMPRESSION MOLDING	112
2.15	Assenza di perdite in ingresso d'aria	124
2.16	Pieghe sigillate	125
2.17	Tipica macchina per Filament-Winding	130
2.18	Configurazione complessa di winding per il V22 grip assembly	130
2.19	Visione finale di un filament winding multipass a singola matassa	131
2.20	Modelli base di filament winding. (a) A elica. (b) Polare. (c) A cerchio.	135
2.21	Alberi motori filament wound	142
2.22	Forme strutturali standard pultruse	145

2.23	Profili non commerciali pultrusi	145
2.24	Strutture space frame	146
2.25	Schema del processo di pultrusione	148
2.26	Contenitori progettati per garantire una continua corsa di uscita del materiale	148
2.27	Strato di tubo su una macchina con due teste pull winder	155
2.28	Pullwinding	157
2.29	Macchinario per la realizzazione di tessuti braiding	159
2.30	Struttura di un braid triassiale	161
2.31	Braiding su di un mandrino assialsimmetrico	161
2.32	Schema di un braider tridimensionale generalizzato	162
2.33	Resistenza dei fori braided rispetto a quelli fatti con le macchine	164
2.34	Schema di automated lay-up di prepreg in matrice termoplastica (risultante in parziale o completo consolidamento)	173
2.35	Schema di consolidamento su matrice di composito termoplastico in pressa	174
2.36	Schema di consolidamento intermittente di composito termoplastico	174
2.37	. . . . .	174
2.38	Schema di diaphragm forming in pressa di composito termoplastico	176
2.39	Schema di diaphragm forming in autoclave di composite termoplastici	176
2.40	Supporti batteria	178
2.41	Frontale	179
2.42	Interazioni fibra-matrice	179
2.43	Schema di Deep drawing	180
2.44	Schema di Roll forming	181
2.45	Schema di Bladder Molding	181
2.46	Schema di liquid molding con matrice termoplastica	182
2.47	Schema di filament winding con matrice termoplastica	183
2.48	Schema di pultrusione con matrici termoplastiche	184
2.49	Schema di pultrusione ad iniezione con matrici termoplastiche	184
3.1	Piramide building-block	189
3.2	Macchina servo-idraulica Instron 8033 con mordacchie	196
3.3	Provino a trazione	197
3.4	Tensione-deformazione Cycom 2020-36%-M55J-140-325	198
3.5	Tensione-deformazione Cycom 2020-36%-M55J-140-325	199
3.6	Tensione-deformazione AS4/PPS	200
3.7	Tensione-deformazione AS4/PPS	201
3.8	Attrezzatura per prove a compressione	202
3.9	Attrezzatura per prove a compressione	203
3.10	Provino a compressione	203

3.11	Curve di compressione provini HM Epoxy Cycom 2020 PV3	204
3.12	Curve di compressione provini HM Epoxy Cycom 2020 PV4	205
3.13	Curve di compressione provini AS4/PPS 48	206
3.14	Curve di compressione provini AS4/PPS 52	207
3.15	Attrezzatura per prove a taglio nel piano Iosipescu	209
3.16	Provino per taglio	209
3.17	Forza-spostamento Cycom 2020-36%-M55J-140-325	210
3.18	Forza-spostamento Cycom 2020-36%-M55J-140-325	211
3.19	Forza-spostamento AS4/PPS	212
3.20	Forza-spostamento AS4/PPS	213
3.21	Attrezzatura per prova a taglio interlaminare	214
3.22	Provino per taglio interlaminare	215
3.23	Forza-spostamento CYCOM 2020-36%-M55J-140-325 PV7	216
3.24	Forza-spostamento Cycom 2020-36%-M55J-140-325 PV8	217
3.25	Forza-spostamento AS4/PPS 50	218
3.26	Forza-spostamento AS4/PPS 53	219
4.1	Giunzione telaio innovativo	224
4.2	Sezione del componente nastrato	224
4.3	Inserto	225
4.4	Assemblaggio	225
4.5	Posizionamento dell'assieme	226
4.6	Braccio antropomorfo per nastratura automatizzata	226
4.7	Telaio FSAE 2009	227
4.8	Telaio nastrato	228
4.9	Angolo di rotazione	230
4.10	Suddivisione corpi	231
4.11	Esempio mesh	231
4.12	Sistemi di riferimento locale	232
4.13	Assegnazione dei materiali	232
4.14	Direzioni nastro unidirezionale	233
4.15	Modello numerico telaio nastrato	234
4.16	Deformata totale telaio nastrato in composito	234
4.17	Valori Path plot telaio nastrato in composito	235
4.18	Andamento delle rotazioni lungo z telaio nastrato	235
4.19	Sovrapposizione andamento delle rotazioni su geometria telaio nastrato	236
4.20	Modello numerico telaio nastrato	237
4.21	Deformata totale telaio nastrato in composito	237
4.22	Valori Path plot telaio tubolare in acciaio	238

4.23	Andamento delle rotazioni lungo z telaio nastrato	238
4.24	Sovrapposizione andamento delle rotazioni su geometria telaio in acciaio	239
4.25	Allestimento prova	239
4.26	Prova di torsione	240
4.27	Valori rotazione telaio	240
4.28	Andamento reale della rigidezza dello chassis lungo le sue diverse sezioni trasversali	240
4.29	Confronto andamenti rigidezze torsionali	241
4.30	Parte elementare del telaio modellata al cad	242
4.31	Parte elementare nastrata	244
4.32	Parte elementare nastrata	244
4.33	Attrezzatura per prova a trazione	245
4.34	Tensione-deformazione provini parte elementare	245
4.35	Modalità di rottura del provino	247
4.36	Deformata totale telaio nastrato in composito	248
4.37	Valori Path plot telaio nastrato	248
4.38	Andamento delle rotazioni lungo z del telaio	249
4.39	Sovrapposizione andamento delle rotazioni su geometria telaio nastrato	249
5.1	Confronto rigidezze telai calcolati	253

Bibliografia

- [1] ASM Metal Handbook Vol. 21
- [2] 3-D Textile REinfocements in Composite Materials; A. Miravete; ed. Woodhead Publishing Limited, Cambridge, 1999 (allegato elettronico)
- [3] Review of applications for advanced three-dimensional fibre textile composites Mouritz, A.P. (Def. Sci. and Technol. Organisation, Aero. Mar. Res. Lab., P.O. Box 4331, Melbourne, Vic. 3001, Australia); Bannister, M.K.; Falzon, P.J.; Leong, K.H. Source: Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, v 30, n 12, p 1445-1461, December 1999 (allegato elettronico)
- [4] B. Das, H.S. Loveless, and S.J. Morris, Effects of Structural Resins and Chopped Fiber Lengths on the Mechanical and Surface Properties of SMC Composites, 36th Annual Conference of the Reinforced Plastics Composites Institute, The Society of the Plastics Industry, 1981
- [5] P.K. Mallick, Fatigue Characteristics of High Glass Content SMC Materials, 37th Annual Technical Conference, Society of Plastics Engineers, 1979, p 589
- [6] E. Dorfman, W.T. Schwartz, Jr., and R.R. Hindersinn, "Fire-Retardant Unsaturated Polyesters," U.S.Patent 4,013,815, 1977
- [7] A. Mekjian and S.P. Qureshi, "Phenolic Resins Technology," paper presented at the Composites Fabricator Association Annual Convention, 18–21 Oct 1995
- [8] D.L. Schmidt, K.E. Davidson, and L.S. Theibert, SAMPE J., Vol 32 (No. 4), 1996 p 44
- [9] S.P. Qureshi, "Fire Resistance and Mechanical Properties for Phenolic Prepregs," paper presented at the FAA International Conf. (Atlantic City, NJ), 9–11 Feb 1993
- [10] S.P. Qureshi and R.A. McDonald, Low Emission, Water-Borne Phenolics for Prepregs and Honeycomb Applications, 37th International SAMPE Tech. Conf., Vol 39, Society for the Advancement of Material and Process Engineering, 1994, p 1023
- [11] S.P. Qureshi, "Fire Resistance and Mechanical Properties for Phenolic Prepregs," paper presented at the FAA International Conf. (Atlantic City, NJ), 9–11 Feb 1993

-
- [12] G. Lubin, Handbook of Composites, Van Nostrand Reinhold Company, New York, NY, 1982, p 146, 154
- [13] H. Gupta and M. McCabe, "Advanced Phenolic Systems for Aircraft Interior," paper presented at the FAA International Conf. for the Promotion of Advanced Fire Resistant Aircraft Interior Materials (Atlantic City, NJ), 9–11 Feb 1993
- [14] S.P. Qureshi, "High Performance Phenolic Pultrusion Resin," paper presented at the 51st Annual Conf., Composites Institute, Society of the Plastics Industry Inc., 1996
- [15] J.G. Taylor, Phenolic Resin Systems for Pultrusion, Filament Winding and Other Composite Fabrication Methods, 44th International SAMPE Symposium, Society for the Advancement of Material and Process Engineering, 23–27 May 1999, p 1123
- [16] J.F. Mayfield and J.G. Taylor, "Advanced Phenolic Pultruded Grating for Fire Retardant Applications," 31st International SAMPE Tech. Conf., 26–30 Oct 1999, Society for the Advancement of Material and Process Engineering, p 142
- [17] J.G. Taylor, Phenolic Resin Systems for Pultrusion, Filament Winding and Other Composite Fabrication Methods, 44th International SAMPE Symposium, Society for the Advancement of Material and Process Engineering, 23–27 May 1999, p 1123
- [18] "Toughened Phenolic Resins for Pultrusion Applications," Georgia-Pacific Resins, Inc., unpublished results, Dec 2000
- [19] Process for Hardening Phenolic Resins, Patent EP 0539098, 1 July 1998
- [20] Thermosetting Phenolic Resin Composition, U.S. Patent 864,003, Jan 1999
- [21] S.P. Qureshi, Recent Developments in Phenolic Resins Technology and Composites Applications, 31st International SAMPE Tech. Conf., 26–30 Oct 1999, Society for the Advancement of Material and Process Engineering, p 150
- [22] M. Gupta and D.W. Hoch, Phenolic Shear Molding Compounds, 31st International SAMPE Symposium, 1986, Society for the Advancement of Material and Process Engineering, p 1486
- [23] R.J. Morgan, E.E. Shin, J. Zhou, J. Lincoln, and B. Rozenberg, Current Durability Issues on High Temperature Polymers Matrix Composites for Aero-Space Applications, Proc. High Temperature Workshop XIX, 1–4 Feb 1999, U.S. Department of Defense and National Aeronautic and Space Administration
- [24] A.W. Snow, The Synthesis, Manufacture and Characterization of Cyanate Ester Monomers, Chemistry and Technology of Cyanate Ester Resins, Hamerton, 1994

- [25] N.G. McCrum et al., Principles of Polymer Engineering, Oxford University Press, 1988, p 272–274
- [26] S.H. Olsen, Manufacturing with Commingled Yarn, Fabrics, and Powder Prepreg Thermoplastic Composite Materials, SAMPE J., Vol 26, 1990, p 31–36
- [27] J. Muzzy et al., Electrostatic Prepregging of Thermoplastic Matrices, Proc. 34th International SAMPE Symposium, Society for the Advancement of Material and Process Engineering, 1989, p 1940–1951
- [28] “Tow Flex Product Guide,” Applied Fiber Systems, Clearwater, FL
- [29] E. Werner, Powder-Based Prepreg Fabric: What, How, Why?, Proc. 42nd International SAMPE Symposium, Vol 42, Society for the Advancement of Material and Process Engineering, 1997, p 706–719
- [30] S. Zelenak et al., The Performance of Carbon Fiber Reinforced PEEK Subassemblies Joined Using a Dual Resin Bonding Approach, Proc. 37th International SAMPE Symposium, Society for the Advancement of Material and Process Engineering, 1992, p 1346–1356
- [31] T.Q. Li et al., Dependence of the Fracture Toughness of Thermoplastics Composite Laminates on Interfacial Interaction, Compos. Sci. Technol., Vol 60 (No. 3), 2000, p 465–476
- [32] H.-H. Kausch and R. Legras, Ed., Advanced Thermoplastic Composites Characterization and Processing, Hanser Publications, 1993, p 173–191
- [33] A.P. Deshpande and J.C. Seferis, Crystallizability in a Model High-Performance Thermoplastic-Matrix Composite, J. Thermoplast. Compos. Mater., Vol 12 (No. 6), 1999, p 498–514
- [34] H.-H. Kausch and R. Legras, Ed., Advanced Thermoplastic Composites Characterization and Processing, Hanser Publishers, 1993, p 113
- [35] J.G. Hutchins, “Operational Durability of Thermoplastic Composites in Primary Aircraft Structure,” 52nd Annual Forum, American Helicopter Society (Washington, D.C.), 4–6 June 1996
- [36] S. Maison et al., Technical Developments in Thermoplastic Composite Fuselages, 19th SAMPE Europe/JEC International Conference (Paris), 22–24 April 1998, Society for the Advancement of Material and Process Engineering, p 3–15
- [37] B. Weteringe et al, Characterization of Microcracking in PPS Laminates, Proc 23rd SAMPE Europe Conference, Paris April 9-11, 2002, pp225-236
- [38] W. Schijve, Fokker 50 Thermoplastic Main Landing Gear Door: Design and Justification, Proc. 38th International SAMPE Symposium, Society for the Advancement of Material and Process Engineering, 1993, p 259–269

- [39] A.R. Offringa, Fokker 50 Main Landing Gear Door: Thermoplastic Processing, Proc. 38th International SAMPE Symposium, Society for the Advancement of Material and Process Engineering, 1993, p 270–281
- [40] Company information brochure, Fokker Aerostructures, Papendrecht, The Netherlands
- [41] “Thermoplastic Aircraft Radome Forming Process Offers High Volume, Low Cost,” Success Story from the Air Force Research Laboratory, posted at www.ml.af.mil/successes/1999/ss99-98295.html
- [42] Daniel Gay, Suong V. Hoa, “Composite materials: Design and applications”, 2.ed., Boca raton [etc.]: CRC, c2007.-XIV, 548p.: ill., 27 cm
- [43] Even J. Barbero, “Introduction to composite materials design”, New York, Milton Park, Taylor and Francis, c1999.-XVII, 336p., 24cm
- [44] Nigel Macknight, The Modern Formula 1 Race Car, Motorbooks International, 1993, p 88–100
- [45] D.H. Middleton, Ed., Composite Materials in Aircraft Structures, Longman Scientific and Technical, 1990, p 17–38
- [46] M.N. Grimshaw, J. Beard, Jr., and M.D. Schulz, Automated Tape Layup of a BMI Vertical Stabilizer Skin, Advanced Composites III: Expanding the Technology, Proceedings of the Third Conference on Advanced Composites, ASM International and the Engineering Society of Detroit, 1987, p 173–182
- [47] <http://www.duqueine.fr/>
- [48] <http://www.netcomposites.com/education.asp?sequence=63>
- [49] S.T. Peters, W.D. Humphrey, and R.F. Foral, Filament Winding, Composite Structure Fabrication, SAMPE Publishers, Covina, CA, 1999
- [50] Compiled data, Handbook of Fillers and Reinforcements for Plastics, Van Nostrand Reinhold, 1978
- [51] George Lubin, Stanley T. Peters, Handbook of Composites, Edition: 2, illustrated, Pubblicato da Springer, 1998, ISBN 0412540207, 9780412540202, 1118 pagine
- [52] Kidd, A.C., Winding and profile Production-Tape, Filament, Pultrusion-Extrusion, Reinforced plastics, In Proc. Electrical Symp., Bristol, Feb 1975, Paper 5, p.18 Preprint 627-61
- [53] Smith A., Pull Winding Techniques improve pultruded Products, Pop. Plast., 1988, 33(4), 42-3
- [54] Show Stewart, D.E., Pullwinding Conf. Proc., 2nd Int. Conf. on Automatic Composites, Paper 15, Noordwijkerhout, The Netherlands, 26-28 Sept.1988

-
- [55] Güneri Akovali, Handbook of Composite Fabrication, Pubblicato da Rapra Technology Ltd, 2001
- [56] L.R. Sanders, Braiding—A Mechanical Means of Composite Fabrication, SAMPE Q., 1977, p 38–44
- [57] D. Brunnschweiler, The Structure and Tensile Properties of Braids, J. Textile Ind., Vol 45, T55-87, 1954
- [58] W.A. Douglass, Braiding and Braiding Machinery, Centrex Publishing, 1964
- [59] J.B. Carter, “Fabrication Techniques of Tubular Structures from Braided Preimpregnated Rovings,” Paper EM85-100, presented at Composites in Manufacturing 4, Society of Mechanical Engineers, 1985
- [60] G.W. Du and F.K. Ko, Geometric Modeling of 3-D Braided Preforms for Composites, Proc. 5th Textile Structural Composites Symposium, 4–6 Dec 1991 (Drexel University, Philadelphia, PA)
- [61] A.B. Macander, R.M. Crane, and E.T. Camponeschi, Fabrication and Mechanical Properties of Multidimensionally (X-D) Braided Composite Materials, Composite Materials: Testing and Design (Seventh Conference), STP 893, J.M. Whitney, Ed., American Society for Testing and Materials, 1986, p 422–443
- [62] F. Ko and D. Hartman, Impact Behavior of 2-D and 3-D Glass/Epoxy Composites, SAMPE J., July/Aug 1986, p 26–29
- [63] D. Brookstein and T. Tsiang, Load-Deformation Behavior of Composite Cylinders with Integrally Formed Braided and Machined Holes, J. Compos. Mater., Vol 19, 1985, p 477
- [64] Analysis and Performance of Fiber Composites, 3rd Edition - Bhagwan D. Agarwal, Lawrence J. Broutman, K. Chandrashekhara - ed. Wiley
- [65] Handbook for Composite Materials (MIL-HDBK-17)
- [66] Relazione Laboratorio di Tesi - Marco Signorelli